

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Geofísica



.....

**OBTENCIÓN DE VELOCIDAD HORIZONTAL DE VIENTO EN
NUBES BAJAS A PARTIR DE ANÁLISIS DE IMÁGENES TSI
(TOTAL SKY IMAGER) Y ALTURA NUBOSA EN
ANTOFAGASTA, CHILE. 2013-2015**

.....

por

DAVID MICHAEL AGUILERA RIQUELME

Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico

Julio de 2016

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Departamento de Geofísica

**OBTENCIÓN DE VELOCIDAD HORIZONTAL DE VIENTO EN NUBES BAJAS
A PARTIR DE ANÁLISIS DE IMÁGENES TSI (TOTAL SKY IMAGER) Y
ALTURA NUBOSA EN ANTOFAGASTA, CHILE. 2013-2015**

DAVID MICHAEL AGUILERA RIQUELME

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Profesor Guía:

Dr. Ricardo Muñoz M. (DGF-UChile)

Comisión Evaluadora:

Dr. Aldo Montecinos G. (DGEO-UdeC)

Dr. Andrés Sepúlveda A. (DGEO-UdeC)



Julio de 2016

©2016 David Michael Aguilera Riquelme.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

*Esto va para toda mi gente,
en particular dedicado a mi familia.*

Agradecimientos

Habiendo terminado este proceso importante para mi persona, agradezco a mi familia por el apoyo en estos 5 años y 1/2 de esta travesía que está pronto por terminar (al menos esta etapa). Agradezco a todos quienes se preocuparon por mí en este tiempo. A la Tía Yanet y el Tío José por su estadía en su hogar por 3 años. A los Rocha's por la estadía por el tiempo restante.

A mis amigos, a los que estaban y los que fueron llegando en este tiempo, también agradezco su preocupación, compañía y comprensión. Son muchos, por lo que no pondré sus nombres, pero sé que lo sabrán (Ir, Km, Ar, Ro, Yr, Hs, Mjo, Sc, Is, Gm, Ns, Dv, Az, entre otros).

A los profesores del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, en los cuales logré aprender un poco más de este bello planeta y de sus interacciones. También agradezco a la comisión evaluadora de esta tesis, en especial a mi profesor guía Dr. Ricardo Muñoz, por su apoyo y gran (pero graaan) paciencia, en mi trabajo y los viajes en Santiago (DGF). Al Dr. Aldo Montecinos, por su apoyo constante desde ya tiempo atrás, y al Dr. Andrés Sepúlveda, el cual siempre ha tenido una excelente disposición conmigo. Aprendí mucho de cada uno de ellos.

Al Proyecto FONDECYT 1130111 "*Dynamics of cloud transitions of an arid coastal atmospheric boundary layer*" (DGF-UChile) el cual proporcionó el financiamiento y parte de los datos utilizados en este estudio, además de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) por los datos de sondeo, y al Prof. Ricardo, quien compiló las bases de datos usadas en esta habilitación profesional.

Finalmente agradezco a mi Dios, que me da la fuerza para seguir.

Índice general

Agradecimientos	III
Lista de figuras	VI
Lista de tablas	VIII
Resumen	IX
1. Introducción	1
1.1. Visión general de la nubosidad en el Pacífico Sur-Oriental	1
1.2. Medición de la nubosidad	2
1.2.1. Medición nubosa a dos cámaras	4
1.2.2. Medición nubosa a una cámara	6
1.2.3. Otras mediciones automáticas de nubosidad	8
1.3. Hipótesis	8
1.4. Objetivos y Estructura	8
1.4.1. Objetivos generales	8
1.4.2. Objetivos específicos	8
1.4.3. Estructura	9
2. Metodología	10
2.1. La base de datos	10
2.2. Problema geométrico	11
2.3. Detección, seguimiento de nubes y obtención de \vec{v}	18
2.4. Observaciones de control	20
2.5. Análisis de sensibilidad y control de calidad	20
2.6. Procesamiento en lote de la base de datos	22
2.7. Herramientas estadísticas utilizadas	25
3. Resultados	27
3.1. Pruebas de control realizadas al método CCM	27
3.2. Análisis de sensibilidad del método CCM	30

3.3. Desempeño del algoritmo en la base de datos	33
4. Discusión	39
4.1. Efectividad del método CCM	39
4.2. Cuestiones relacionadas a los datos de entrada	42
5. Conclusión	44
Bibliografía	46
A. Notas sobre la propagación de errores	50
B. Regresión lineal para calibración de φ	52
C. Gráficos toroidales 2D (o “gráficos de rosquilla”), de Fisher & Lee (1983)	54
D. Soporte computacional utilizado	60
E. Código fuente de algunos programas destacados	61

Índice de figuras

1.1. Estratocúmulos subtropicales observados por satélite GOES, el 4 de septiembre de 2009, 20:45 UTC.	2
1.2. Configuración geográfica y detección satelital de nubes estratiformes en Antofagasta, Chile. De Muñoz <i>et al.</i> (2011).	3
1.3. Climatología de la varación horaria de la nubosidad en Antofagasta, Chile. De Muñoz <i>et al.</i> (2011).	4
1.4. Principio estereofotogramétrico para triangular nubes. De Janeiro <i>et al.</i> (2014).	5
1.5. Detección de altura y orientación geográfica de Janeiro <i>et al.</i> (2014).	5
1.6. Dispositivo Total Sky Imager (TSI), de Yankee Environmental Systems Inc.	6
1.7. Diagrama de configuración sistema estereofotogramétrico TSI de tres cámaras, de Peng <i>et al.</i> (2015)	6
1.8. Imagen compuesta de 3 imágenes TSI, solapadas mediante un algoritmo automático de similaridad. Extraído de Peng <i>et al.</i> (2015)	7
1.9. Diagrama de búsqueda de patrones de Chow <i>et al.</i> (2011), basado en el método de la correlación cruzada (CCM).	7
2.1. Fotografía TSI y su máscara automática, 27 de diciembre 2013 (11:47 UTC). Fuente: base de datos del trabajo.	11
2.2. Esquema del problema geométrico sistema TSI - nubosidad. Elaboración propia	12
2.3. Imagen de control para realizar regresión polinómica de φ	13
2.4. Proyección de ángulos sobre espejo hemisférico del TSI. Usado para ajustar φ_e	16
2.5. Ejemplo del problema geométrico aplicado a 1 pixel. Día 11-oct-2014, 11:39 UTC.	17
2.6. Diagrama del método de correlación cruzada de Hamill y Nehr Korn (1993).	19
2.7. Lanzamiento de rutina del radiosonda a las 12 UTC, en el Aeropuerto Cerro Moreno de Antofagasta, Chile. Fotografía cortesía Prof. Ricardo Muñoz.	21
2.8. Diagrama de flujo del procesamiento en lote de las imágenes	22
2.9. Diagrama de flujo del subproceso Método CCM.	23
2.10. Esquema de procesamiento CCM para análisis de sensibilidad sobre imagen	24

3.1. Prueba de seguimiento de patrones con el método CCM, dominio de la banda roja RGB. 27-dic-2013	27
3.2. Prueba de seguimiento de patrones con el método CCM, dominio de la correlación cruzada. 26-oct-2014	28
3.3. Prueba de seguimiento de patrones con el método CCM, dominio de la banda roja RGB. 26-oct-2014	29
3.4. Prueba de seguimiento de patrones con el método CCM, dominio de la correlación cruzada. 26-oct-2014	29
3.5. Resultados Análisis de Sensibilidad para velocidad del viento	31
3.6. Resultados Análisis de Sensibilidad para correlación cruzada	32
3.7. Resultados Análisis de Sensibilidad en el dominio del tiempo	33
3.8. Análisis de Monte Carlo para significancia estadística de la correlación, base de datos completa	36
3.9. Comparación modelo-observaciones a base de datos, primer control de calidad	37
3.10. Comparación modelo-observaciones a base de datos, segundo control de calidad	37
3.11. Comparación eventos que componen probabilidad condicional, sobre la base de datos completa	38
4.1. Prueba de seguimiento de patrones con el método CCM, dominio de la banda roja RGB. 4-abr-2014	40
4.2. Prueba de seguimiento de patrones con el método CCM, dominio de la correlación cruzada. 4-abr-2016	41
4.3. Descomposición en escala de grises, canales RGB imágenes del día 4 de abril de 2014, 11:54 UTC (arriba) y 27 de diciembre de 2013, 11:27 UTC (abajo). De izquierda a derecha: Rojo, Verde, Azul	43
C.1. Coordenadas tóricas	54
C.2. Esquema gráfico toroidal 2D de Fisher y Lee (1983)	55

Índice de cuadros

2.1. Observaciones de marcas sobre banda de sombra, usadas para calibración por mínimos cuadrados de φ_e	15
2.2. Listado de casos para el análisis de sensibilidad	23
2.3. Estadísticos de verificación utilizados	26
2.4. Definiciones elementales en tabla de contingencia. Visto en Jolliffe y Stephenson (2003).	26
3.1. Resultados del análisis de sensibilidad en los casos propuestos	34
3.2. Resultados de las pruebas de correlación sin procesar (QC1) y bajo el control de calidad nuevo (QC2)	34
3.3. Resultados de la prueba usando compuesto de componentes de probabilidad condicional	35
3.4. Tabla de contingencia de detección de elementos	35
B.1. Tabla (2.1) repetida en Apéndice.	53
D.1. Soporte computacional utilizado para la ejecución del método de la correlación cruzada.	60
D.2. Cantidad de datos procesados en el soporte computacional	60

Resumen

La conformación de una Capa Límite Marina en las costas del Pacífico Sur-oriental responde a la presencia del Anticiclón del Pacífico Sur, que fuerza la surgencia costera y provoca nubes bajas. La ubicación, correspondiente con la rama descendente de la celda de circulación de Hadley-Walker, provoca una inversión de subsidencia que encierra esta capa límite y su nubosidad, la cual tiene un notorio ciclo diario. Observaciones humanas y luego automáticas en todo el mundo, en particular el Aeropuerto Cerro Moreno de Antofagasta, Chile, permiten apreciar los cambios nubosos durante el día. Cada vez es más necesario el conocimiento de la nubosidad, en ámbitos medioambientales, energéticos (energías renovables) y para la seguridad del transporte. Una de las mediciones típicas, la velocidad del viento, es calculada en la columna de aire usando el radiosondeo diario que la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) realiza a las 12:00 UTC. Sin embargo el uso del globo sonda se hace económicamente restrictivo para realizar mediciones de alta frecuencia temporal. Se propone un método óptico basado en el Total Sky Imager (TSI), un dispositivo consistente en un espejo hemisférico y una cámara, que captura la cubierta celeste completa desde superficie; y un nefobasímetro, que mide la altitud de las nubes, con datos de alta frecuencia. Haciendo un cálculo trigonométrico y un análisis de correlación cruzada (CCM), es posible calcular la velocidad de las nubes, para posteriormente pasar por un proceso de control de calidad y validación frente a las observaciones de sonda. El proceso realizado mostró que existen fuertes discrepancias en casos donde la nubosidad no permitía contrastar patrones reconocibles por el método CCM. La validación ejecutada sobre los 18 meses procesados mostró que el método de control de calidad inicial (Correlación >0.8 y $V_{mag} \in [1\text{m s}^{-1}, f * (H_{cloud})]$) no fue suficiente para asegurar que las observaciones dadas por el modelo se ajusten a su par dado por el radiosondeo, con correlaciones entre magnitud de 0.006 (no significativa) y -0.8 (significativa pero no útil) en dirección. Aumentando las exigencias ($0.85 < \text{Correlación} < 0.925$, $V_{mag} \in [1, f * (H_{cloud})]$ y $H_{cloud} < 1250\text{m}$) se logra mejorar la correlación entre las variables (0.398 en magnitud y -0.76 en dirección, ambas significativas). El caso en que se cumplen los eventos E_1 (Δ Dirección $< 30^\circ$) y E_2 (Δ Magnitud $< 0.5 \text{ m s}^{-1}$), tiene una probabilidad de 13.1%. El porcentaje máximo de falsa alarma del método es de 66.1%. Con estos antecedentes no es posible validar el método dadas las fuertes exigencias impuestas al método, la falla de detección de movimiento en patrones muy nubosos y la poca cantidad de datos que superan los eventos simultáneos. Se propone como futura investigación el uso de las tres bandas RGB de la fotografía y usar un método estereofotogramétrico para obtener los valores de altura de nube en cada píxel de la imagen.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Visión general de la nubosidad en el Pacífico Sur-Oriental

La nubosidad en los niveles bajos de la tropósfera es un aspecto común en gran parte de la Tierra. En promedio, a lo largo del año el 20% del planeta está cubierto con alguna variedad de nubes bajas (ver por ej. [Warren *et al.*, 1988](#); [Wood, 2012](#)). Su importancia en el balance de energía terrestre es tal que su adecuada representación se hace mandatoria en los modelos numéricos climáticos y de predicción del tiempo ([Painemal *et al.*, 2010](#); [Painemal y Zuidema, 2010](#); [Wittenberg *et al.*, 2006](#)). El trabajo de [Hartmann *et al.* \(1992\)](#) muestra además que las nubes bajas (Cumulus [Cu] y Stratocumulus [Sc]) son responsables del mayor forzamiento radiativo dado por nubosidad, con valores de 60% de dicho forzamiento (-16 W m^{-2} en dicho estudio), esto porque la nubosidad baja posee alto albedo y por lo tanto es reflejada parte de la radiación solar de onda corta, enfriando las capas inferiores y la superficie marina/terrestre ([Garratt, 1994](#)).

Debido al constante desarrollo del Anticiclón del Pacífico Sur la región subtropical del Pacífico Sur-oriental presenta aguas frías debido a la surgencia costera forzada por el viento que sopla frecuentemente desde el sur-sureste, provocando la formación de una Capa Límite Marina (CLM) fría y la presencia permanente de nubosidad baja por procesos de calentamiento adiabático de la atmósfera ([Garreaud y Muñoz, 2004](#)). La zona del centro-norte de Chile además presenta una marcada inversión de subsidencia, pues aquí se encuentra la rama descendente de la celda de circulación de Hadley-Walker ([Garreaud y Rutllant, 2006](#); [Muñoz *et al.*, 2011](#)). Dicha capa límite está atrapada, con aire frío bajo la nubosidad, y aire cálido sobre ella. La nubosidad se expande por cientos de kilómetros mar adentro ([Muñoz *et al.*, 2011](#)), modulando la climatología de la zona costera (véase Figs. 1.1; 1.2c,d). Una característica importante de la nubosidad presente es su marcado **ciclo diario** (ver Fig.1.3) que varía entre una CL bien acoplada y encerrada por nubosidad hacia el amanecer, hasta un

estado de desacoplamiento nuboso y su capa inferior (sub-nube) dentro de la CL por efectos de calentamiento radiativo por la tarde (detalles en Garratt, 1994; Garreaud y Muñoz, 2004; Rozendaal *et al.*, 1995). Además, estudios sugieren que la convergencia-divergencia continental actúa como mecanismo que refuerza este ciclo diario (Rozendaal *et al.*, 1995).



Figura 1.1: Estratocúmulos subtropicales observados por satélite GOES, el 4 de septiembre de 2009, 20:45 UTC. Grandes extensiones de nubes tipo-Sc cubren el Océano Pacífico. Imagen obtenida de Wood (2012).

Con todo esto, la humedad presente en las nubes estratiformes y nieblas suponen riesgos a la seguridad del transporte, especialmente el de tipo aéreo. La baja visibilidad cerca de las pistas de aterrizaje costeras obliga a los pilotos y controladores de vuelo a cambiar el procedimiento de pilotaje, desde un vuelo guiado por visión (*ing.* Visual Flight Rules) hacia uno netamente instrumental (*ing.* Instrument Flight Rules), cambio que no está exento de riesgos y provoca retrasos o cancelaciones de vuelos comerciales en aeropuertos (Clark y Wilson, 1996; Reynolds *et al.*, 2012). Por otro lado, la población en las costas del norte de Chile aprovecha estas formaciones nubosas para producir agua potable, usando “atrapanieblas”, dispositivos basados en una malla que logran atrapar agua condensada que se incrusta al equipo, para luego recolectarse en pozos justo en su zona inferior (Cereceda, 2000).

1.2. Medición de la nubosidad

Históricamente, la medición de la cubierta nubosa ha estado asociada a observadores humanos entrenados que describen la formación, fracción cubierta (octas), desplazamiento, entre otras variables (ver por ej. Eastman y Warren, 2013). A mediados del Siglo XX este procedimiento fue estandarizado mediante el código sinóptico propuesto por la Organización Mundial de Meteorología (WMO, 1974). Las observaciones humanas poco a poco han

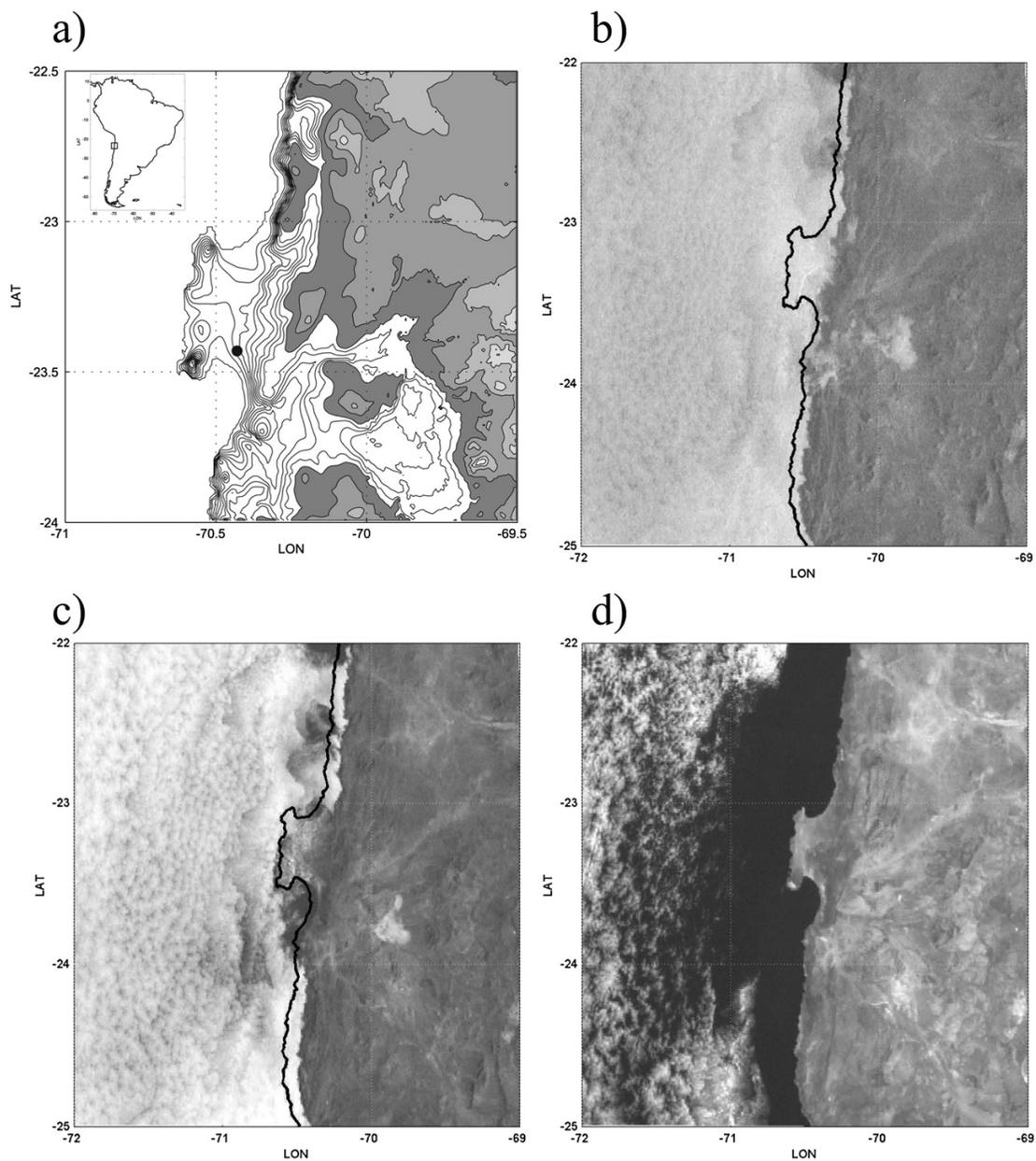


Figura 1.2: (a) Topografía alrededor de la Península de Mejillones. El círculo negro marca la estación Aeropuerto Cerro Moreno, Antofagasta. Imagen Visible GOES a las (b) 10:39, (c) 11:39, y (d) 16:39 UTC del día 11 de Noviembre de 2006. Extraída de Muñoz *et al.* (2011).

sido sustituidas por sensores fotográficos y de percepción remota, los cuales permiten tener una mayor continuidad y mejor cobertura temporal de los datos, no obstante los productos resultantes no están exentos de problemas, ya que ciertos sensores remotos de nubosidad arrojan tendencias no replicadas por otro tipo de sensores, mostrando ciertas incoherencias entre productos de nubosidad, además de la baja resolución disponible (Dim *et al.*, 2011; Ghonima *et al.*, 2012). Otras formas alternativas de estimar la cubierta de nubes es usando modelos numéricos de predicción del tiempo (NWP en inglés), los cuales permiten tener

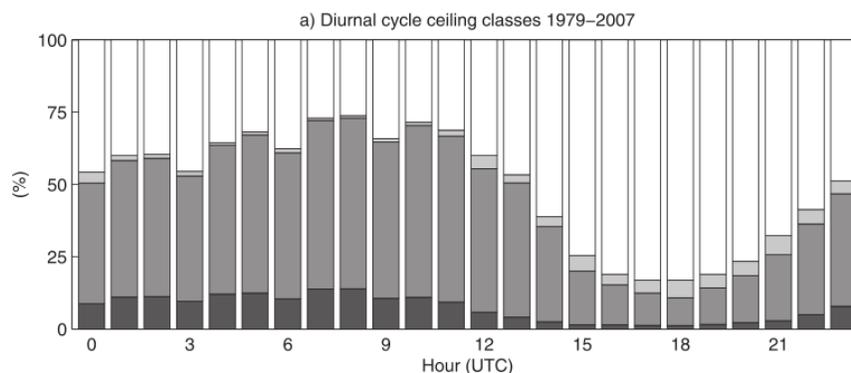


Figura 1.3: Variación horaria climatológica entre 1979-2007 de la nubosidad en Antofagasta, Chile. De oscuro a claro se muestran las frecuencias de ocurrencia: Altura nubosa < 500 m, 500 m < altura nubosa < 1500 m, altura nubosa > 1500 m, cielo despejado. De Muñoz *et al.* (2011).

una cobertura espacial y temporal personalizada y un pronóstico aceptable para la escala temporal sinóptica. Sin embargo, existen sesgos y errores al estimar la irradiación (ver por ej. Remund *et al.*, 2008), además de que los modelos numéricos no pueden resolver la mesoescala de mayor resolución, y las nubes no son resueltas por ellos (Chow *et al.*, 2011).

Actualmente en el campo de la producción energética solar, es necesario observar y pronosticar el campo de nubosidad para así estimar y optimizar la generación de electricidad durante el día (Wittmann *et al.*, 2008). Para ello se han desarrollado sensores fotográficos puestos en superficie que permiten calcular la cubierta nubosa de manera automatizada. A continuación se detallará el estado del arte en el instrumental y la técnica utilizada para medir el movimiento y propiedades de las nubes.

1.2.1. Medición nubosa a dos cámaras

La estereofotogrametría es una técnica en donde se combinan dos imágenes de un mismo objeto o entidad con un ligero desplazamiento entre ellas, lo cual permite detectar estructuras y patrones tridimensionales al superponerlas (véase Fig. 1.4). En el caso de la nubosidad, se han desarrollado variados dispositivos que usan este principio para medir la velocidad, dirección y altura nubosa. Janeiro *et al.* (2014) realiza una descripción de un dispositivo basado en dos cámaras DSLR Canon EOS 1000D, las cuales están conectadas por red de área local (Ethernet), un computador personal y un circuito basado en el microcontrolador Arduino, que actúa como disparador remoto de las cámaras. Ambas están separadas 28.9 m entre sí, y mediante un software, son capaces de encontrar el norte geográfico (usando las estrellas), solapar adecuadamente las dos fotografías y determinar propiedades de las nubes (ver Fig. 1.5).

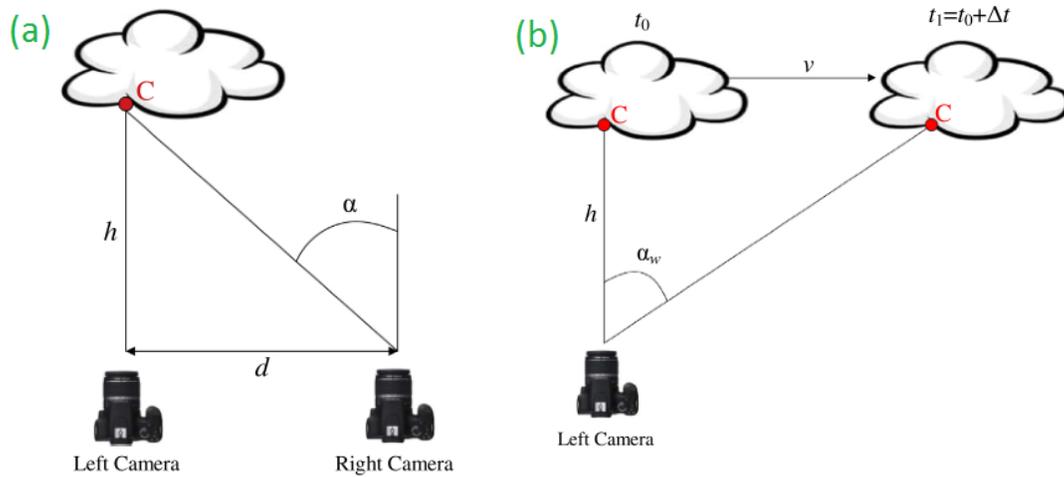


Figura 1.4: (a) Principio de triangulación para nubes basado en estereofotogrametría. (b) Medición de la velocidad usando cámaras. Imágenes tomadas del artículo de Janeiro *et al.* (2014).

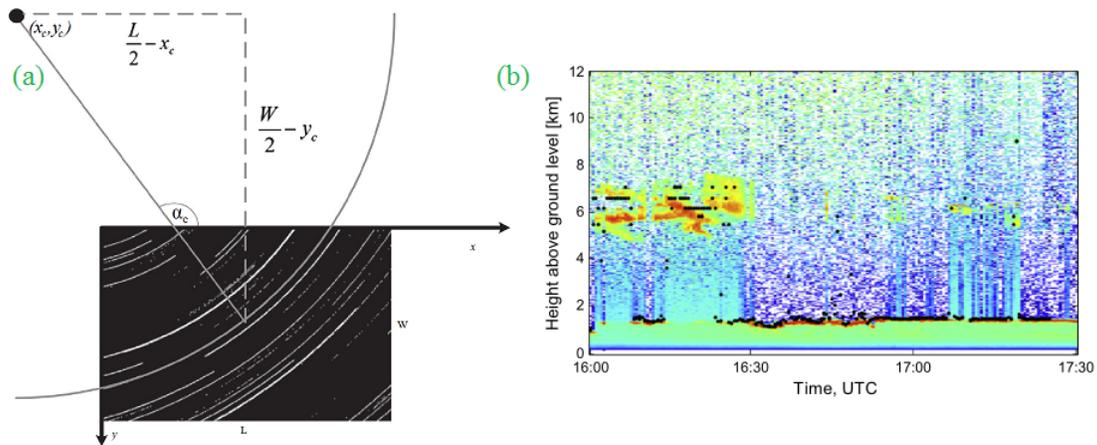


Figura 1.5: (a) Método de obtención del norte geográfico. Se observa un patrón de estrellas con el sistema, y se traza su trayectoria. El centro aparente de esta trayectoria es el norte. (b) En puntos negros, la detección de altura de la base nubosa usando sistema estereofotogramétrico. En colores cálidos, alturas para la nubosidad obtenidas mediante LIDAR. Imagen tomada de Janeiro *et al.* (2014)

Una extensión de esta metodología es la que presenta Peng *et al.* (2015). En su artículo, se emplea tres dispositivos Total Sky Imager (TSI) — usado en la presente Habilitación Profesional — consistente cada uno en una cámara apuntada hacia abajo (dirección nadir) sostenida por un pedestal, la cual observa un espejo semi-hemisférico que refleja la cubierta total del cielo en un horizonte no demasiado lejano (ver Fig. 1.7). Esto permite realizar una mejor estimación tridimensional de las nubes (dado el enfoque estereofotogramétrico).

Un análisis en rigurosidad y otras metodologías con dispositivos más sofisticados se puede encontrar en la revisión de Tapakis y Charalambides (2013).



Figura 1.6: Dispositivo Total Sky Imager (TSI) fabricado por la empresa Yankee Environmental Systems Incorporated.

Imagen descargada de <http://maddenjulianconversation.blogspot.com/2011/10/we-are-modelers-in-field-program.html>

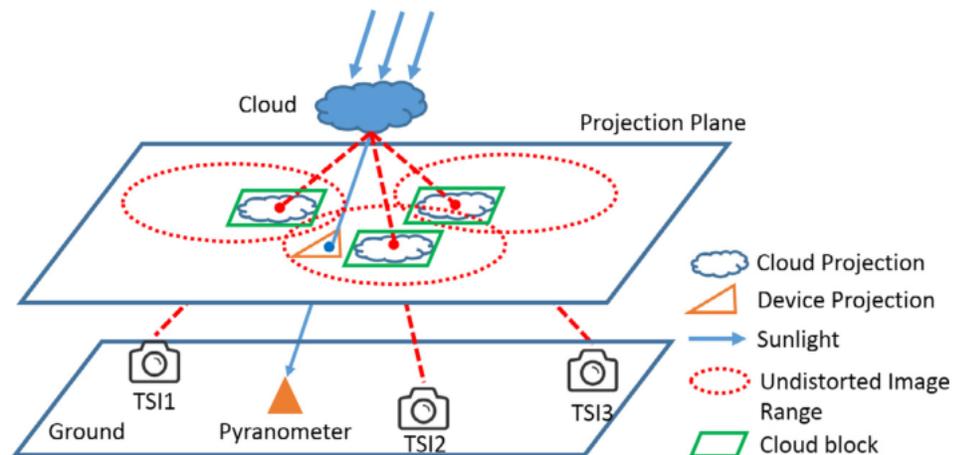


Figura 1.7: Esquema de Peng *et al.* (2015). Tres dispositivos TSI observan un objetivo en el cielo (nube) que se encuentra entre sus tres campos de visión. Un sistema computacional es capaz de calcular la similitud entre los patrones de nube observados para determinar vectores de movimiento y puntos de solapamiento entre las imágenes.

1.2.2. Medición nubosa a una cámara

Cuando se tiene solo un sensor fotográfico en superficie, es requerido tener uno de los datos para realizar el cálculo trigonométrico: la altura de la nubosidad. Dado que se tienen observaciones 2D, mediciones con radiosonda o un nefobasímetro son necesarias para completar



Figura 1.8: Imagen compuesta de 3 imágenes TSI, solapadas mediante un algoritmo automático de similitud. Extraído de Peng *et al.* (2015)

el cálculo, y por consiguiente la posición del objetivo (nube) en el espacio cartesiano 3D. El artículo de Chow *et al.* (2011) presenta una metodología orientada al pronóstico de muy corto plazo de nubosidad para la producción de energía solar. Utiliza un equipo TSI y un algoritmo de búsqueda de patrones en la imagen (ver Fig. 1.9), de modo de obtener campos de velocidad de las nubes para luego calcular una advección futura y poder de esta forma pronosticar el campo nuboso en el tiempo.

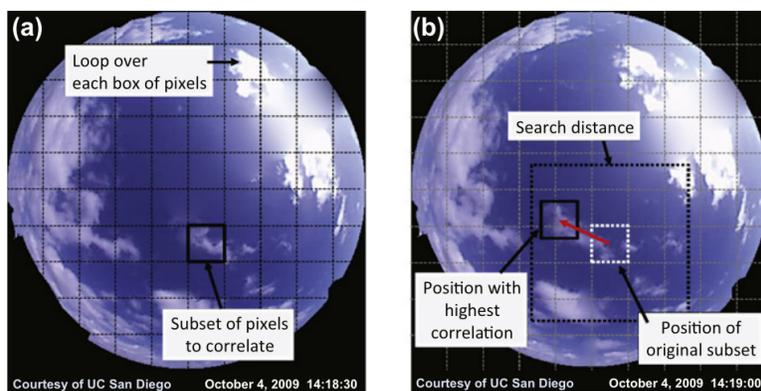


Figura 1.9: Sistema de búsqueda de patrones de Chow *et al.* (2011). Se identifica un patrón (un trozo de píxeles) de la imagen 1 en un tiempo t . En un tiempo $t + i$ con $i = 1, 2, 3, \dots$ se evalúa dentro de un rectángulo de búsqueda alrededor de la posición donde se encontraba el patrón original en la primera imagen, en la nueva fotografía. Se evalúa la correlación cruzada para detectar el desplazamiento.

1.2.3. Otras mediciones automáticas de nubosidad

No menos importante es también la adquisición de imágenes de satélites meteorológicos (para más detalles revisar Tapakis y Charalambides, 2013, sección 3.2). Una gran desventaja de la percepción remota de nubosidad es la tasa de adquisición de imágenes, especialmente en satélites de órbita polar, en la cual un satélite demora horas y hasta días en volver al mismo punto. Por otra parte, satélites de órbita ecuatorial o *geoestacionaria* sí permiten un muestreo de la atmósfera a mayor rapidez, dado que observan siempre la misma área terrestre. Ejemplos de medición de velocidad nubosa usando satélites ya se han documentado desde hace varias décadas atrás (ver por ej. Leese *et al.*, 1971, que usa una metodología similar a la nuestra).

La eficacia de estas mediciones de percepción remota satelital están fuera del alcance del presente trabajo, por lo que no serán discutidas con mayor detalle.

1.3. Hipótesis

Con todos estos antecedentes podemos afirmar lo siguiente

Dado un registro secuencial de imágenes del cielo y una referencia de altitud es posible diagnosticar el campo de velocidad en la capa más baja de la nubosidad usando un procedimiento automático, el cual será consistente con observaciones realizadas en el lugar.

1.4. Objetivos y Estructura

1.4.1. Objetivos generales

El objetivo general de este trabajo es generar un producto de velocidad de viento determinado con un análisis óptico de las nubes de una región en particular (en nuestro caso, el Aeropuerto Cerro Moreno de Antofagasta, Chile; código SFCA [ICAO]), con valores comparables a las de otros sensores meteorológicos ampliamente validados.

1.4.2. Objetivos específicos

Para realizar este objetivo general, se requiere realizar lo siguiente:

1. Comprender y usar una base de datos de imágenes de nubes, y una base de datos de alturas de base nubosa.
2. Desarrollar un algoritmo de detección y seguimiento de nubes.
3. Desarrollar un algoritmo de medición de distancia en el espacio 3D, a partir de cálculos trigonométricos sobre la imagen.
4. Acoplar (2) y (3) para obtener un algoritmo de cálculo de desplazamiento y por consiguiente velocidad de nubes.
5. Clasificar la base de datos de imágenes de nubes, y buscar casos de ejemplo para probar el conjunto (4), comprobar la certidumbre y la sensibilidad del algoritmo.
6. Hacer correr el software por toda la base de datos y validar el cálculo con radiosondeos.
7. Determinar fallos o aciertos del sistema, y evaluar el desempeño general.

1.4.3. Estructura

La presente Habilitación Profesional se estructura como sigue: El capítulo 2 describe las bases de datos y el procedimiento matemático-algorítmico que permite realizar el cálculo del producto de velocidad, además de los procedimientos estadísticos usados para validación. El capítulo 3 mostrará los resultados de las pruebas realizadas, que serán discutidos en el capítulo 4. Las conclusiones de esta experiencia se detallan en el capítulo 5. Referencias y Contenido Anexo se ubican en el Apéndice, hacia el final del documento.

Capítulo 2

Metodología

2.1. La base de datos

La base de datos de imágenes utilizada en el presente trabajo de Habilitación Profesional es un archivo secuencial de imágenes capturadas con un dispositivo TSI-440 recolectadas por el Prof. Ricardo Muñoz M. (DGF-UChile) como parte de sus estudios del Proyecto FONDECYT 1130111 “*Dynamics of cloud transitions of an arid coastal atmospheric boundary layer*”. El archivo proviene de la instalación del equipo en el Aeropuerto Cerro Moreno, Antofagasta, Chile. Contiene imágenes desde el 13 de diciembre de 2013 hasta el 30 de junio de 2015, tomadas en periodo diurno e intervaladas 30 segundos entre ellas. Cada imagen es un archivo de imagen JPEG, resolución 640 por 480 píxeles, en espectro visible RGB. También se tiene una máscara automática generada por el software integrado del TSI, que detecta elementos como el brazo de sombra, la posición del sol y las nubes. Estas son imágenes PNG de 400 por 400 píxeles, no usadas para este estudio. También se tienen películas en formato MPEG con las observaciones diarias, de modo de realizar un escaneo más rápido de la base de datos. Aproximadamente un día de datos son 30 MB de espacio de disco y unas 1440 fotografías. El proceso de lectura, realizado con el software MATLAB®, incluye rutinas que leen en bloque los directorios, con el fin de reciclar el programa para realizar la ejecución de forma repetida.

En paralelo se tiene una base de datos de un nefobasímetro Vaisala CL31 ubicado muy cerca del TSI. Los datos se encuentran desde el 1 de agosto de 2013 hasta el 15 de diciembre de 2015, ya previamente almacenados en un archivo binario MAT.

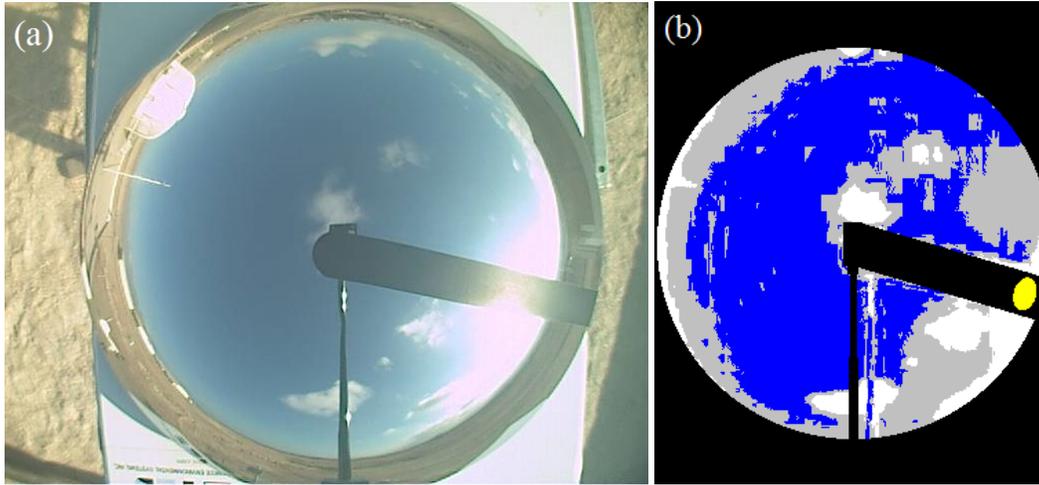


Figura 2.1: (a) Fotografía RGB del TSI. Fecha: 27 de diciembre de 2013, 11:47 UTC. (b) Máscara generada por TSI. En amarillo el Sol, en azul el cielo detectado como despejado, en gris y blanco la cubierta nubosa. En negro se marca el poste de la cámara, la banda de sombra y la imagen no usada. Misma fecha. Fuente: Base de datos del trabajo.

2.2. Problema geométrico

Como ya ha sido mostrado en la Fig. (2.1a), la imagen obtenida por el TSI es el reflejo del cielo visible para un observador en superficie, sobre un espejo hemisférico. Esto producirá una aberración en el cálculo de la posición celeste, pues el espejo deforma la imagen hacia los bordes. Para ello se requiere hacer un cambio de coordenadas adecuado, desde el sistema cartesiano 2D (plano de los píxeles) de la imagen a un sistema coordenado 3D, en adelante llamado “coordenadas celestes”, que representan puntos (x_r, y_r, z_r) en el mundo real.

El primer paso del problema geométrico es la conversión de las coordenadas de los píxeles a un sistema esférico proyectado en la imagen (r, φ_e, θ) , el cual está representado en la Fig. (2.2). Cabe mencionar que la figura está orientada en la dirección azimutal de θ . La transformación de coordenadas está basada en el procedimiento de *Shields et al.* (2009), y es:

$$\theta = \text{mód} \left[\tan^{-1} \left(\frac{y_p - v}{x_p - u} \right) + \frac{\pi}{2}, 2\pi \right] \quad (2.1)$$

$$\varphi_e = a_0 + a_1 r_p + a_2 r_p^2 + a_3 r_p^3 + a_4 r_p^4 \quad (2.2)$$

Las ecuaciones anteriores muestran las coordenadas angulares θ – ángulo acimutal (note la distribución de los píxeles en Fig. 2.10) restringido entre 0 y 2π – y φ_e – ángulo cenital

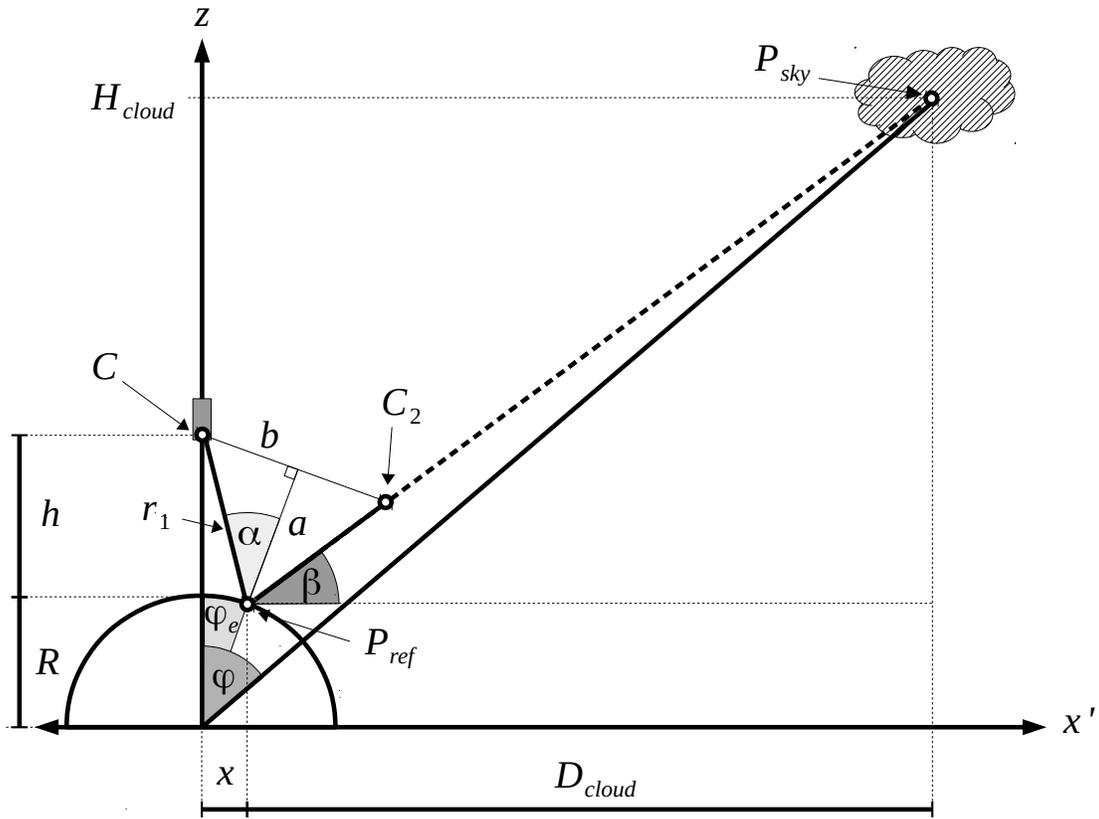


Figura 2.2: Esquema del sistema espejo hemisférico/cámara - nube. C, C_2, P_{ref}, P_{sky} señalan puntos de control (cámara, rayo reflejado de cámara, reflexión y punto de la nube reflejada, respectivamente). El sistema está orientado en el plano nube-espejo-cénit a modo de simplificación (eje x'). Elaboración propia.

Nombres de variables: Puntos [Cámara C y su reflejo C_2 , punto de reflexión P_{ref} , punto objetivo P_{sky}], ángulos [cenital verdadero φ , cenital efectivo φ_e , elevación horizontal β , semi-reflexión α], longitudes [$a, b, r_1, D_{cloud}, x, h, R, H_{cloud}$].

efectivo del objeto reflejado – donde x_p, y_p corresponden a las coordenadas de los píxeles de la imagen, u, v son las coordenadas del centro de la imagen, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 son coeficientes a determinar mediante un ajuste de mínimos cuadrados con algunos puntos de control, $r_p = \sqrt{(x_p - u)^2 + (y_p - v)^2}$ es el radio desde el centro de la imagen al píxel determinado. La función $o = \text{mód}[m, n]$ – función módulo – entrega el residuo de la división m/n de modo que

$$\frac{m - o}{n} = \left[\frac{m}{n} \right]$$

Esto es, entrega el valor necesario que se debe restar el numerador del cociente para obtener una división exacta.

El ajuste para encontrar los coeficientes de la Ec. (2.2) se realizó usando una imagen de con-



Figura 2.3: Imagen de control para realizar regresión. Contiene marcas en la banda de sombra. Puntos rojos representan la selección manual de las marcas para realizar el ajuste por mínimos cuadrados. En el [Apéndice B](#) se detalla el ajuste efectuado.

trol (Fig. 2.3). Se obtienen puntos en la imagen seleccionados manualmente por el usuario ubicados sobre las marcas realizadas en la banda de sombra del TSI – colocada sobre el espejo – a 2.5 cm de separación desde el centro del dispositivo. Luego se calcula φ (ángulo cenital verdadero, véase Fig. 2.4) usando la simple relación

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{d}{R}\right) \quad (2.3)$$

Donde $R = 22.86$ cm es el radio del espejo hemisférico y d es la proyección horizontal del arco de longitud $S = 2.5$ cm delimitado por las marcas.

Los cálculos son desplegados en la Tab. (2.1). Como se trata de una proyección directa y no de una reflexión propiamente tal, los valores angulares del ángulo cenital verdadero corresponden también con el ángulo cenital efectivo ($\varphi_e = \varphi$ cuando el punto está sobre el espejo). Un ajuste por mínimos cuadrados a un polinomio de grado permite determinar el valor de a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 . El [Apéndice B](#) incluye los coeficientes calculados de esta regresión, al final de este documento.

Con la Ec. (2.2) calibrada, se puede determinar el ángulo α , el cual corresponde a la bisectriz del ángulo que delimita el rayo reflejado entre la cámara y la nube, recordando las leyes de reflexión en óptica. Para ello se requiere conocer el rayo r_1 . Analizando la Fig. (2.2), se puede determinar que la proyección de r_1 en el eje-z es $R+h-R\cos\varphi_e$, y como la proyección horizontal de R en la coordenada x' es $R\sin\varphi_e$, se puede determinar la ecuación analítica

del rayo r_1 entre la cámara y el punto de reflexión como:

$$r_1 = \sqrt{(R+h-R\cos\varphi_e)^2 + R^2\sin^2\varphi_e} \quad (2.4)$$

En donde h es la altura de la cámara respecto del espejo (altura del brazo). R, φ_e se definen de la misma manera que antes.

El rayo r_1 y su reflejo forman un triángulo isósceles, al cual se le trazó una recta desde C , hasta su reflexión C_2 . Se traza además la bisectriz que es perpendicular a la recta antes mencionada, correspondiendo además con la recta trazada por el ángulo φ_e . De la Fig. (2.2) podemos obtener la siguiente relación trigonométrica (sencilla) para el ángulo α :

$$\tan\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \frac{b}{a} \quad (2.5)$$

Ahora bien, el punto donde se interseca el segmento $\overline{CC_2}$ con el segmento a tiene coordenadas $((R+h)\sin\varphi_e, (R+h)\cos\varphi_e)$. Si se considera que el triángulo es trasladado más cerca hacia el eje- z , es fácil darse cuenta que los catetos del triángulo que comprende el ángulo α (a, b) son:

$$\begin{aligned} a &= (R+h)\cos\varphi_e - R \\ b &= (R+h)\sin\varphi_e \end{aligned}$$

Luego, sustituyendo en Ec. (2.5), se obtiene una expresión para α y para β – ángulo de elevación nube-horizontal del reflejo – sabiendo que $\beta = \pi/2 - \alpha - \varphi_e$ (demostración de forma directa).

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\varphi_e}{\cos\varphi_e - \frac{R}{h+R}}\right) \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \varphi_e - \tan^{-1}\left(\frac{\sin\varphi_e}{\cos\varphi_e - \frac{R}{h+R}}\right) \quad (2.7)$$

Queda por determinar la distancia horizontal TSI-nube D_{cloud} , la cual se obtiene directamente:

$$D_{cloud} = H_{cloud} \cot \beta \quad (2.8)$$

Donde H_{cloud} es la altura de la nubosidad medida con otro instrumento (en nuestro caso, nefobasímetro). Como se puede apreciar en la Fig. (2.2), el ángulo que observa la cámara para un objeto reflejado que no está en el borde del espejo no necesariamente corresponde con el ángulo cenital verdadero, sin embargo para propósitos de aproximación, y dado que la altura de la nube H_{cloud} es mucho mayor que la altura total del TSI ($H_{cloud} \gg h + R$), se puede usar la aproximación $\varphi_e \approx \varphi$.

S (cm)	d (cm)	$\varphi_e = \sin^{-1}(d/R)$ (deg)
0	0	0
2.5	2.5	6.2785
5.0	4.96	12.5313
7.5	7.37	18.8079
10.0	9.68	25.0524
12.5	11.89	31.3404
15.0	13.95	37.6065
17.5	15.84	43.8611
20.0	17.54	50.1101

Cuadro 2.1: Observaciones realizadas usando marcas en la banda de sombra del TSI. S corresponde al arco de circunferencia subtendido, d es la proyección de S en la horizontal. Más información en Fig. (2.4).

Calculando D_{cloud} , φ , θ para cada píxel en la imagen, se puede realizar una conversión a coordenadas celestes, usando el siguiente conjunto de ecuaciones de transformación de coordenadas:

$$x_r = D_{cloud} \sin \theta \quad (2.9)$$

$$y_r = D_{cloud} \cos \theta \quad (2.10)$$

$$z_r = H_{cloud} \quad (2.11)$$

P Estas coordenadas sí corresponden al espacio 3D real de la cubierta del cielo sobre el TSI. Dado en el Sistema Internacional de Unidades (SI), x_r, y_r, z_r están en unidades de [m].

Las suposiciones que son necesarias para realizar este cálculo son las siguientes, derivadas de Chow *et al.* (2011):

1. La curvatura de la Tierra es despreciable
2. La cubierta nubosa es una única capa plana, con una altura constante H_{cloud} sobre toda la imagen

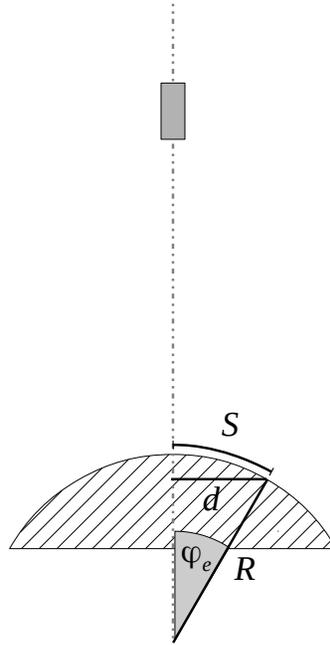


Figura 2.4: Esquema de proyección de S sobre el espejo hemisférico del TSI. Donde d es la proyección de S en la horizontal, desde el centro del espejo. R es el radio del espejo. φ_e es el ángulo cenital de este arco de circunferencia S . Ilustración basada en una figura realizada por Prof. R. Muñoz.

Para ilustrar cómo el problema geométrico convierte un dominio de píxeles de la fotografía en una posición tridimensional en el espacio real, mostramos un caso en que se aplicaron las ecuaciones de forma manual, en la Fig. (2.5)

De la Figura podemos obtener los siguientes valores de los parámetros angulares y de distancia:

$$r_1 = \sqrt{(120 - 200)^2 + (75 - 200)^2} = 140.41 \text{ px}$$

$$\theta = \text{mód} \left[\tan^{-1} \left(\frac{75 - 200}{120 - 200} \right) + 90^\circ, 360^\circ \right] = 327.08^\circ$$

$$\varphi_e = a_0 + a_1 r_1 + a_2 r_1^2 + a_3 r_1^3 + a_4 r_1^4 = 20.76^\circ (*)$$

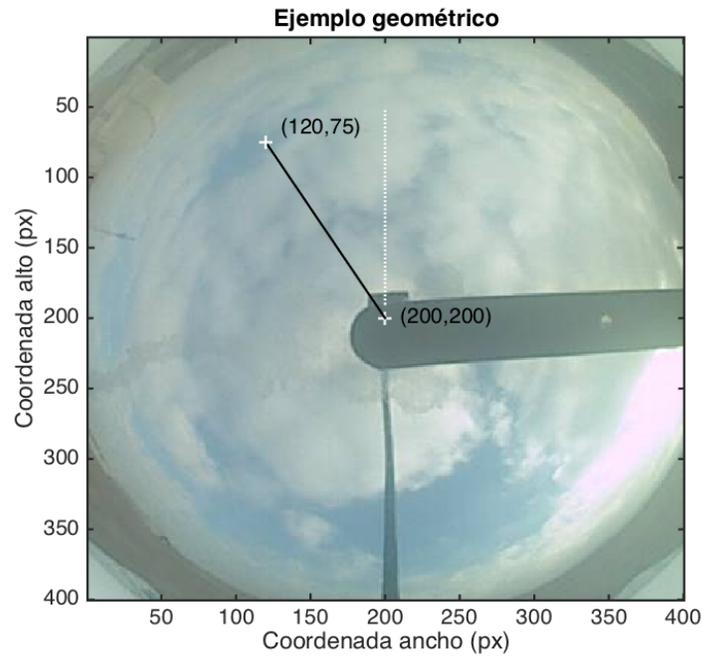


Figura 2.5: Ejemplo de uso del problema geométrico aplicado a 1 píxel, día 11 de octubre de 2014, 11:39 UTC. La altura de la nube en dicho instante es de 625 m. El píxel escogido es arbitrario. El eje blanco punteado marca el acimut 0 grados, el cual es medido en sentido horario.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin 20.76^\circ}{\cos 20.76^\circ - 0.3719} \right) = 32.18^\circ$$

$$\beta = 90^\circ - 20.76^\circ - 32.18^\circ = 37.06^\circ$$

$$D_{cloud} = 625 \cot 37.06^\circ = 827.7 \text{ m}$$

(*) Se usan los coeficientes del Apéndice B.

La transformación geométrica muestra la posición 3D:

$$x_r = 827.7 \sin 327.08^\circ = -446.18 \text{ m}$$

$$y_r = 827.7 \cos 327.08^\circ = 697.15 \text{ m}$$

$$z_r = 625 \text{ m}$$

2.3. Detección, seguimiento de nubes y obtención de \vec{v}

Una vez obtenida la proyección en el espacio 3D de la imagen TSI y conocida la posición real de cada uno de los píxeles, se desarrolla un algoritmo que pueda detectar y seguir patrones nubosos en la imagen. Se escogió usar el algoritmo de las correlaciones cruzadas propuesto por Hamill y Nehrkorn (1993). El proceso opera escogiendo un patrón en una imagen (en adelante, la banda roja de la fotografía, más detalles en Chow *et al.*, 2011), el cual es correlacionado con un área de búsqueda más grande en una imagen en el futuro (ver Fig. 2.6). La dirección donde se presenta la mayor correlación cruzada entre el patrón y área de búsqueda corresponderá a la dirección en que el objetivo se desplazó. Usando el método descrito en la sección anterior es posible obtener el desplazamiento total, y por consiguiente la velocidad de la nube, realizando una diferenciación numérica ordinaria.

La función de correlación cruzada (similar a Bourke, 1996) está definida de la siguiente forma:

Sean dos matrices $\mathbf{I} \in \mathbb{M}^{m \times n}$, $\mathbf{T} \in \mathbb{M}^{p \times q}$ (las matrices Imagen y Patrón, respectivamente). La función de correlación cruzada normalizada $\mathbf{X} \in \mathbb{M}^{k \times l}$ en donde $k = m - p + 1$, $l = n - q + 1$ se obtiene en componentes como:

$$X_{u,v} = \frac{\sum_{i,j} (I_{i,j} - \bar{I}_{u,v})(T_{i-u,j-v} - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i,j} (I_{i,j} - \bar{I}_{u,v})^2 \sum_{i,j} (T_{i-u,j-v} - \bar{T})^2}} \quad (2.12)$$

Donde $0 \leq u \leq m - p$, $0 \leq v \leq n - q$. El término $\bar{I}_{u,v}$ corresponde a la media de I dentro del área patrón ubicada en la posición (u, v) , y se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{I}_{u,v} = \frac{1}{pq} \sum_{a=u}^{u+p-1} \left(\sum_{b=v}^{v+q-1} I_{a,b} \right) \quad (2.13)$$

\bar{T} es la media del patrón T . Los índices de los sumandos en Ec. (2.12) van como sigue: $0 \leq i \leq m - 1, 0 \leq j \leq n - 1$.

Se destaca en esta oportunidad que se ajustó la matriz de correlación cruzada normalizada a un tamaño que contuviera todos los píxeles de la imagen, rellenando con ceros los espacios que no se calcularon usando todos los píxeles del patrón, es decir, donde el solapamiento patrón-imagen no es completo.

El cálculo de Ec. (2.12) es prohibitivo en el sentido de su costo computacional a medida que crece el tamaño del patrón y la imagen, particularmente debido al cálculo del denominador (Briechle y Hanebeck, 2001; Lewis, 1995). Para obtener una computación más rápida que la forma directa, se puede optimizar el proceso usando tablas de sumas y una transformación al dominio de la frecuencia usando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y tablas de sumas precomputadas (Lewis, 1995). Este proceso se describe en forma detallada en artículos como el de Briechle y Hanebeck (2001). Varios paquetes de cálculo numérico (como MATLAB®) poseen esta función de manera nativa.

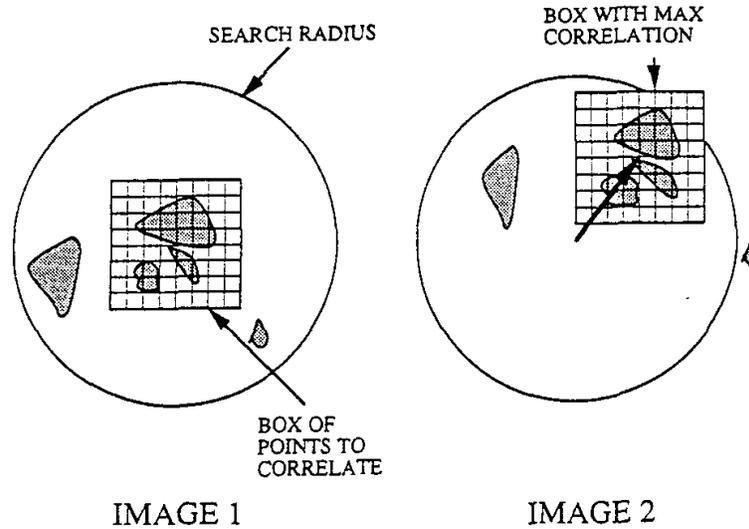


Figura 2.6: Diagrama del método de correlación cruzada de Hamill y Nehrkorn (1993). Se elige un patrón en la primera imagen, y se correlaciona dicho patrón con un área de búsqueda de la segunda imagen. La dirección de la máxima correlación, respecto del centro del patrón en imagen 1, es el desplazamiento del objetivo capturado en la imagen patrón.

La descomposición en componentes cartesianas del vector velocidad, como también sus componentes vectoriales son:

Vector velocidad en forma cartesiana (horizontal):

$$\vec{v} = [u, v] = \left[\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right] \approx \left[\frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t} \right] \quad (2.14)$$

Desplazamientos horizontales:

$$\Delta x = x_r^{(2)} - x_r^{(1)} \quad \Delta y = y_r^{(2)} - y_r^{(1)} \quad (2.15)$$

Módulo de la velocidad (rapidez):

$$||\vec{v}|| = \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\Delta t} \quad (2.16)$$

Dirección del vector velocidad (formato meteorológico):

$$\hat{v} = - \left[\sin \left(\frac{3\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{v}{u} \right) \right), \cos \left(\frac{3\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{v}{u} \right) \right) \right] \quad (2.17)$$

2.4. Observaciones de control

Para validar la metodología, se comparan las velocidades calculadas cercanas a las 12 UTC, con la información del lanzamiento de radiosonda diario que la Dirección Meteorológica de Chile realiza diariamente, dado que la estación Cerro Moreno es parte de la red *Global Climate Observing System Upper-Air Network* (WMO, 2002). Estas observaciones se encuentran en el repositorio de la Universidad de Wyoming (disponible en la red <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). El Profesor Ricardo Muñoz M. (UCHile) consolidó las observaciones de radiosondas en una base de datos basada en MATLAB®, que incorpora grabaciones de alta frecuencia de las condiciones de la columna de aire en el tiempo dado, además de la fecha y hora de lanzamiento y diversas variables meteorológicas medidas por el dispositivo. Debido a que es una observación puntual en el tiempo y en el espacio, se considera la validación en la ventana entre las 11:25 a 12:00 UTC entre el método propuesto y la observación de radiosondas.

2.5. Análisis de sensibilidad y control de calidad

Para probar la robustez del método de la correlación cruzada (en adelante, CCM) frente a la elección del patrón a buscar, se realiza un análisis de sensibilidad en virtud de analizar cómo la correlación cruzada (normalizada) varía de acuerdo al lugar, tamaño y periodo de donde se escoge el patrón, y cómo influye dicha elección en la velocidad obtenida por el algoritmo. Para ello se eligen distintos días en la base de datos, en horas cercanas al lanzamiento del radiosonda del Aeropuerto Cerro Moreno (12:00 UTC) a modo de comparación (corresponde a la ejecución del proceso descrito en la Fig. 2.9). Los casos comparados se describen en la Tab. (2.2).



Figura 2.7: Lanzamiento de rutina del radiosonda a las 12 UTC, en el Aeropuerto Cerro Moreno de Antofagasta, Chile. Fotografía cortesía Prof. Ricardo Muñoz.

Un posprocesamiento del cálculo efectuado por el método CCM se realiza al aplicar un filtro digital de mediana 2D el cual rectifica las matrices de velocidad por componente (U,V) de valores anómalos que puedan empeorar los cálculos posteriores. A continuación se emplea un umbral de velocidad permitida, basado en una modificación del criterio propuesto por Chow *et al.* (2011).

$$V_{inf} < V(i, j) < \lfloor \Delta H * f \rfloor \quad \& \quad CC(i, j) > 0.8 \quad (2.18)$$

En donde $V_{inf} = 1 \text{ ms}^{-1}$ es una velocidad umbral inferior que es capaz de restringir elementos tales como la banda de sombra, ΔH es la altura sobre el nivel del suelo de la base nubosa, $f \approx 1/60 \text{ Hz}$ es una frecuencia asignada mediante el criterio de muestreo de Nyquist (Nyquist, 1928) y $CC(i, j)$ es el coeficiente de correlación cruzada normalizada.

2.6. Procesamiento en lote de la base de datos

Al realizar el análisis de sensibilidad y determinar un criterio que proporcione un control de calidad, se implementará un esquema de procesamiento en lote de la base de datos de imágenes TSI, a modo de obtener las variaciones y cuantificación de la velocidad del viento en la base de las nubes con el tiempo. Los elementos que supone realizar un proceso de estas características son:

1. El procesamiento considera la consolidación de las bases de datos de imágenes TSI, radiosondeos y mediciones de altura nubosa por nefobasímetro.
2. Se verifica la presencia de nubosidad en cada paso (Li *et al.*, 2011). En el caso de no detectarse, el cálculo prosigue en la siguiente iteración agregando valores nulos a la salida, con un considerable ahorro de tiempo de cómputo cuando existen ventanas temporales con cielo despejado de gran duración.
3. Se aplica control de calidad a la salida en cada paso.
4. Se almacena de forma ordenada y jerárquica los resultados del procesamiento, para una posterior comparación con observaciones de sonda.

La Fig. (2.10) muestra la ejecución gráfica del método de la correlación cruzada en un caso particular, mientras que el diagrama de flujo de la Fig. (2.8) muestra la cadena de procesos realizados para procesar las imágenes en lote.

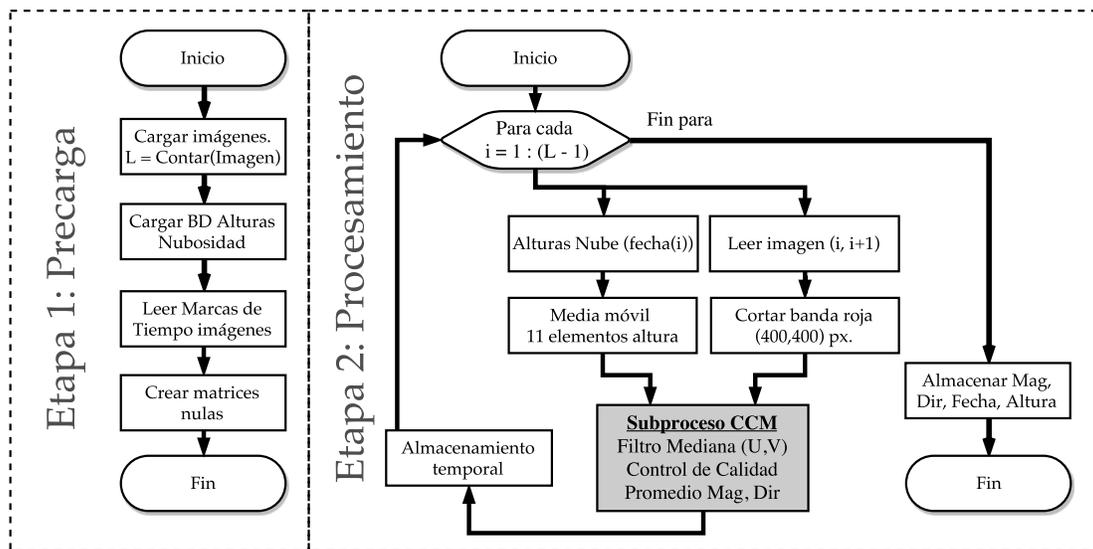


Figura 2.8: Esquema del procesamiento en lote de las imágenes. El subproceso del método de la correlación cruzada (CCM) [en gris] es idéntico al descrito en la Fig. (2.9). Elaboración propia.

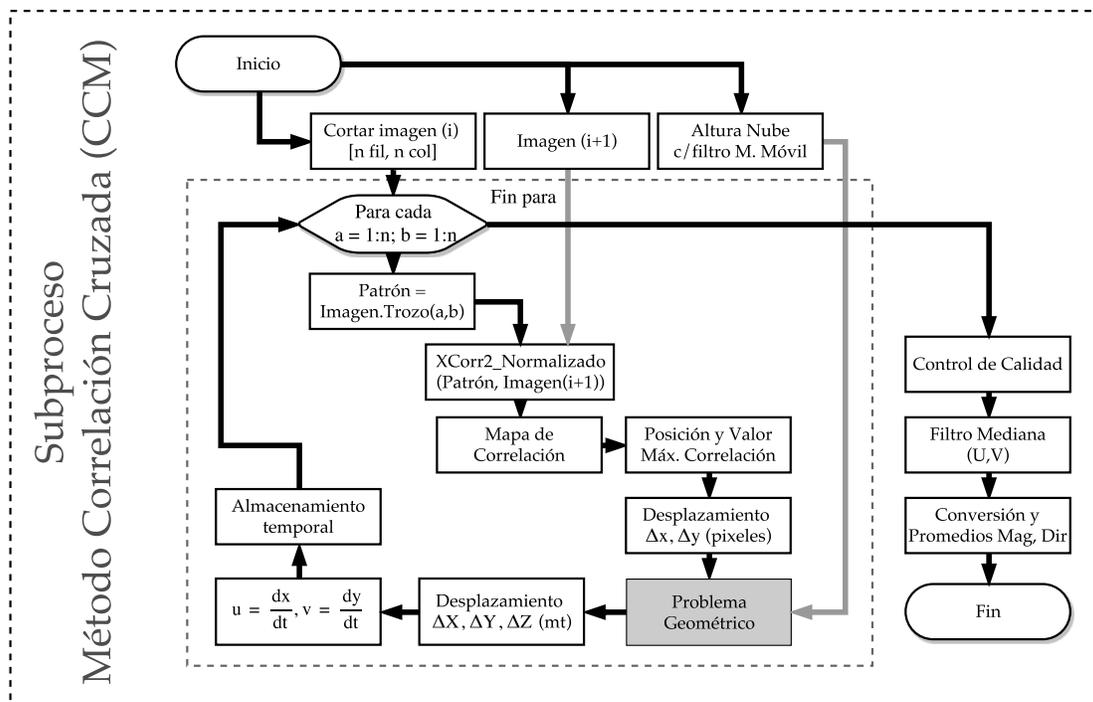


Figura 2.9: Diagrama de flujo del subproceso CCM (Cuadro gris de Fig. (2.8)). Basado en la idea de Hamill y Nehrkorn (1993), que se puede revisar en la Fig. (2.6). El análisis de sensibilidad propuesto sólo ejecuta esta parte del programa. Elaboración propia.

Caso #	Fecha/Hora (Tiempo UTC)	M	N (px)	G	$V_{m,o}$ ($m s^{-1}$)	$V_{d,o}$ (deg)	ΔH (m)	Objetivo de prueba <i>Tipo sensibilidad</i>
1	01-10-2014 11:32	400	40	10	2.8	197	589	Calidad de imagen
2.1	11-10-2014 11:39	400	40	10	3.0	55	616	Variabilidad HF
2.2	11-10-2014 11:41	400	40	10	3.0	55	616	Variabilidad HF*
2.3	11-10-2014 11:43	400	40	10	3.0	55	616	Variabilidad HF*
3.1	07-11-2014 11:39	400	20	10	2.5	34	922	Tamaño patrón
3.2	07-11-2014 11:39	400	40	20	2.5	34	922	Tamaño patrón
3.3	07-11-2014 11:39	400	80	5	2.5	34	922	Tamaño patrón
4	08-11-2014 11:36	400	40	10	4.0	50	1130	Persistencia

Cuadro 2.2: Casos empleados para realizar el análisis de sensibilidad. M es el tamaño del cuadrado de búsqueda, N es el tamaño del cuadrado patrón. G indica la cantidad de secciones en (x,y) se dividió el cuadrado de búsqueda. $V_{m,o}$ y $V_{d,o}$ corresponde a la magnitud y dirección del viento encontrada en la base de la nube por el radiosonda. ΔH es la altura sobre el suelo de la base de la nube.

En asterisco, observaciones alejadas del tiempo del radiosonda en la nube por más de 2 minutos.

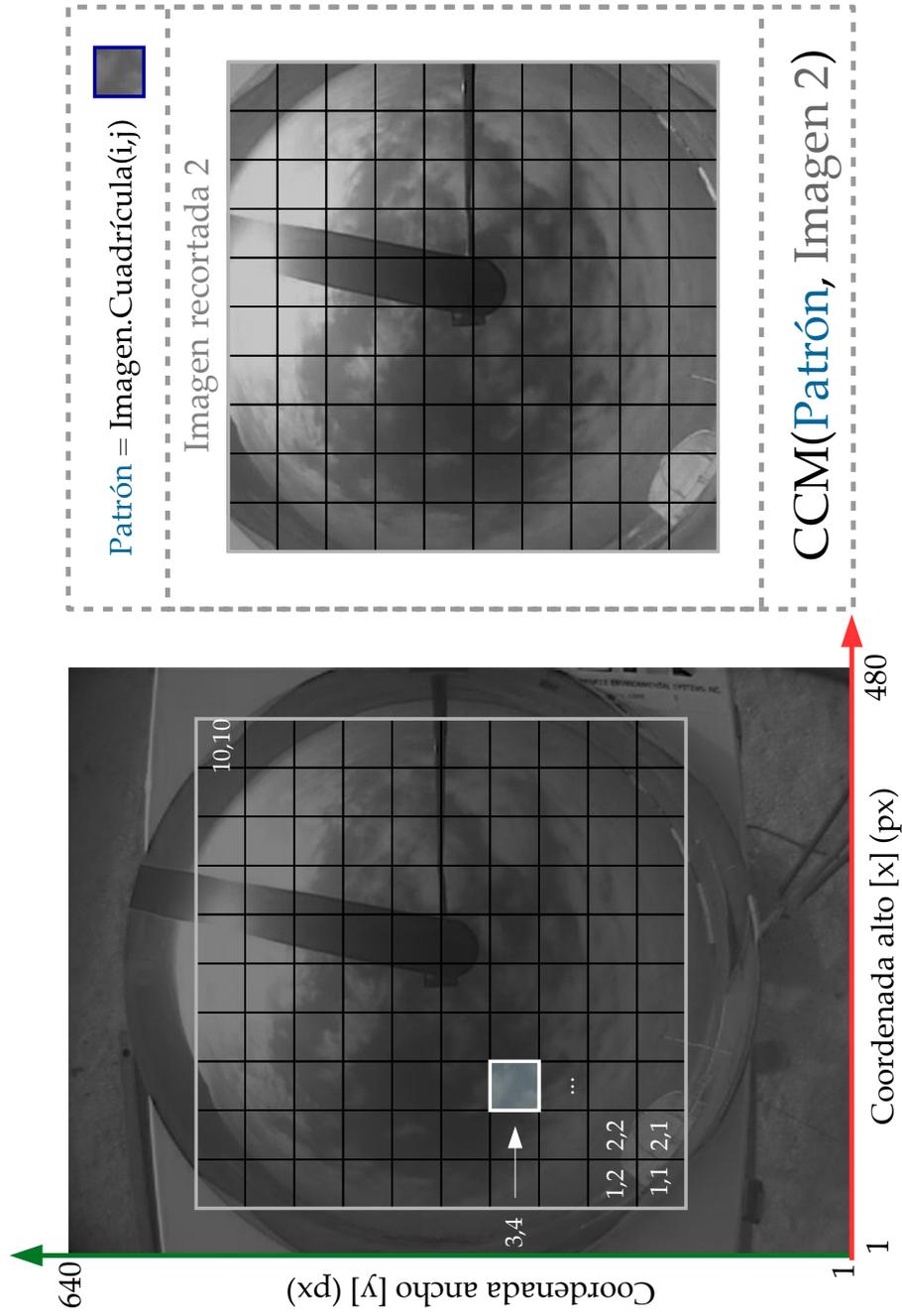


Figura 2.10: Esquema de procesamiento CCM para análisis de sensibilidad sobre imagen del 7 de noviembre de 2014, 11:34 UTC. Para efectos de trabajo con archivos de imagen, MATLAB® carga la imagen en memoria como aparece en la figura a la izquierda. Se recorta un cuadrado en la imagen de tamaño $M \times M$ y se crea una grilla de la cual se extraerá un patrón (trozo de imagen de tamaño $N \times N$) para correlacionar Imagen (en tiempo $t = t_{i+1}$) con Patrón y calcular el desplazamiento. El proceso continúa hasta recorrer la imagen completa. Note la disposición de las coordenadas. Elaboración propia.

2.7. Herramientas estadísticas utilizadas

Para el análisis posterior y validación del algoritmo se usaron herramientas estadísticas agrupadas en cuatro categorías:

1. Estadísticos lineales: No consideran datos circulares. Estos son *media*, *desviación estándar*, *correlación*, *raíz del error cuadrático medio (RMSE)*, *sesgo (bias)*, *mediana*, *desviación absoluta de la mediana (MAD)*.
2. Estadísticos circulares: Consideran datos periódicos. Estos son *media angular*, *desviación estándar angular*, *correlación angular*.
3. Probabilidad condicional y estadísticos de verificación
4. Significancia estadística: Simulación de Monte-Carlo (10000 experimentos) a un nivel de confianza de 95 %, prueba-*t* para la correlación r a dos colas y 5 % de significación, con el estadístico de control $t_c = r\sqrt{N-2}/\sqrt{1-r^2}$.

Los estadísticos del primer grupo no requieren mayor definición aparte de la convencional. Textos como Wilks (2011) contienen la mayoría de las definiciones de estos estadísticos. El segundo grupo lo conforman un conjunto de funciones que permiten trabajar directamente con ángulos y en general operan “bien” ante los múltiplos de un giro ($\pm 2\pi$). Más detalles se pueden encontrar en el artículo de Berens (2009). Aquí algunas ecuaciones de los estadísticos circulares: La media angular está definida de la siguiente manera:

$$\bar{\alpha} = \text{atan2}(R_y, R_x) \quad (2.19)$$

En donde $\vec{R} = [R_x, R_y]$ es el vector promedio, formado de la siguiente manera:

$$\vec{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\cos \alpha_i, \sin \alpha_i] \quad (2.20)$$

El contador $i = 1, 2, \dots, N$ es la cantidad de ángulos ingresados al promedio.

La correlación circular (también llamada correlación ángulo-ángulo) está definida de la siguiente manera (Fisher y Lee, 1983; Zar, 1984):

$$\rho_{\alpha, \beta} = \frac{\sum_i \sin(\alpha_i - \bar{\alpha}) \sin(\beta_i - \bar{\beta})}{\sqrt{\sum_i \sin^2(\alpha_i - \bar{\alpha}) \sin^2(\beta_i - \bar{\beta})}} \quad (2.21)$$

Esta función goza de propiedades similares a su variante lineal (valores entre -1 y 1, entre otros).

La desviación estándar angular se calcula de forma aproximada como (Berens, 2009; Zar, 1984):

$$S_0 = \sqrt{-2 \ln R} \tag{2.22}$$

En donde $R = \|\vec{R}\|$ es la magnitud del vector promedio.

La probabilidad condicional $P(E_1|E_2)$ – la ocurrencia del evento E_1 dado que ocurrió el evento E_2 – está definida como (Wilks, 2011):

$$P(E_1|E_2) = \frac{P(E_1 \cap E_2)}{P(E_2)} \tag{2.23}$$

También se usaron las definiciones de los estadísticos para verificación: Tasa proporción correcta (PC), tasa de falsas alarmas (FAR), probabilidad de detección (POD) y tasa de detecciones falsas (F). Para más detalles, se puede consultar el texto de Jolliffe y Stephenson (2003).

Detalle	PC	FAR	POD	F
Seg. E_1	$PC = \frac{a+c}{n}$	$FAR = \frac{b}{a+b}$	$POD = \frac{a}{a+c}$	$F = \frac{b}{b+d}$
Seg. E_2	Ídem	$FAR_2 = \frac{c}{a+c}$	$POD_2 = \frac{a}{a+b}$	$F_2 = \frac{c}{c+d}$
Cita clave	Finley (1884)	Swets (1986)	Donaldson <i>et al.</i> (1975)	Swets (1986)

Cuadro 2.3: Estadísticos de verificación utilizados en las pruebas. Más detalles en Jolliffe y Stephenson (2003). $n = a + b + c + d$ es el tamaño de la muestra. PC es la proporción correcta, FAR es la tasa de falsas alarmas, POD es la probabilidad de detección y F es la tasa de detecciones falsas.

	Condición	Evento 2		Suma
		Sí	No	
Evento 1	Sí	a	b	a+b
	No	c	d	c+d
	Suma	a+c	b+d	n

Cuadro 2.4: Definiciones elementales en tabla de contingencia. Visto en Jolliffe y Stephenson (2003).

Capítulo 3

Resultados

3.1. Pruebas de control realizadas al método CCM

Previo al lanzamiento del modelo en la base de datos, se realizaron pruebas para determinar la correcta detección de patrones de imagen bien definidos y su posterior desplazamiento. Se detalla a continuación un caso de ejemplo bien definido en la Fig. (3.1).

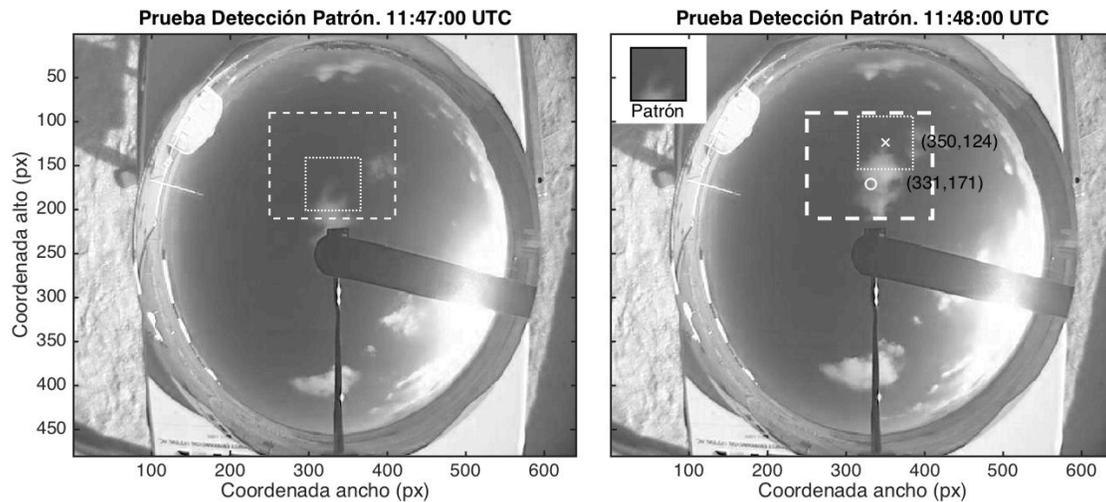


Figura 3.1: (a) Imagen inicial de la prueba de detección y seguimiento de patrones, día 27 de diciembre de 2013, 11:47 UTC. (b) Imagen adelantada 60 s (11:48 UTC). Círculo y cruz blanca marcan las posiciones inicial y final del seguimiento. Cuadro de línea discontinua marca el área de búsqueda en ambas imágenes, mientras que el cuadro pequeño con línea punteada marca la selección del patrón y la detección, respectivamente.

Se puede apreciar en las imágenes en banda roja (Fig. 3.1) que patrones con clara distinción del cielo de fondo (niveles digitales distintos) son detectados 60 segundos más tarde, considerando que la nubosidad cambia con el tiempo dado su configuración de flujo turbulento.

La matriz de correlación cruzada normalizada (Fig. 3.2) es capaz de detectar el desplazamiento de la parcela de nube, en este caso de buena calidad, en donde se logra distinguir claramente el máximo ($\rho = 0.93$ a 60 s), alejado de valores a su alrededor (tonalidades azules).

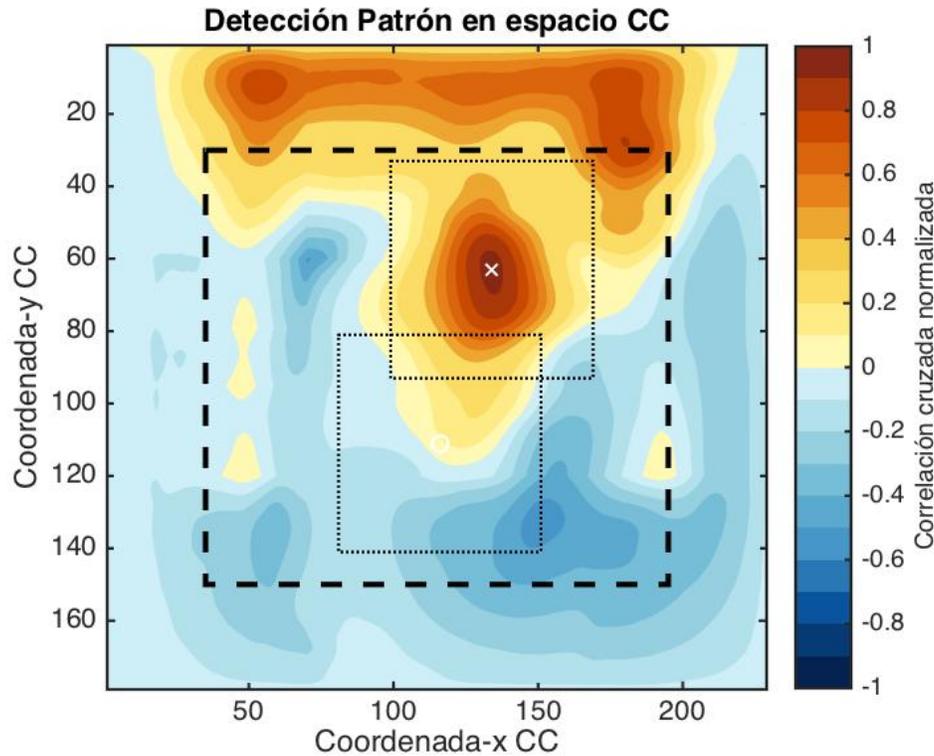


Figura 3.2: Matriz de correlación cruzada de la prueba realizada día 27 de diciembre 2013, 11:48 UTC. (Ver Fig. 3.1). Cuadro de línea discontinua marca la región de búsqueda – área en que la correlación cruzada usa todos los píxeles del patrón – y los cuadros con línea punteada marcan el origen (marcado con punto blanco) y la detección (cruz blanca) de la máxima correlación. Notar las dimensiones de la matriz (patrón + área de búsqueda - 1) .

Conviene preguntarse qué pasa si se utiliza un caso en que la nubosidad es menos distinguible, y el patrón es más borroso. La Fig. (3.3) muestra que con una cubierta nubosa más estratiforme es posible detectar el desplazamiento, sin embargo es más probable encontrarse con desplazamientos irreales. Esto se puede ver en la matriz de correlación (Fig. 3.4), en donde si bien el máximo de correlación es detectado ($\rho = 0.84$ a 60 s), la intensidad de la misma puede jugar en contra, pudiendo haber casos no-unimodales, y por tanto ser capaces de generar movimiento aleatorio. Sin embargo si la nubosidad logra mostrar patrones (nubes tipo Stratocumulus en vez de Stratus) que sean distinguibles en los niveles digitales del patrón, y la cubierta celeste se desplaza de forma uniforme, es posible detectar acertadamente el desplazamiento de la parcela.

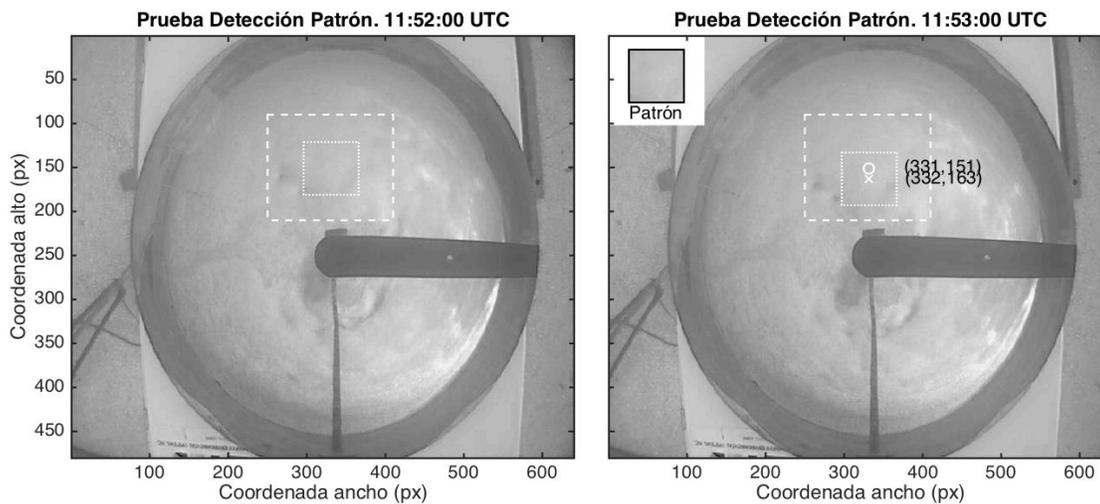


Figura 3.3: (a) Imagen inicial de la prueba de detección y seguimiento de patrones, día 26 de octubre de 2014, 11:52 UTC. (b) Imagen adelantada 60 s (11:53 UTC). Notación similar a Fig. (3.1).

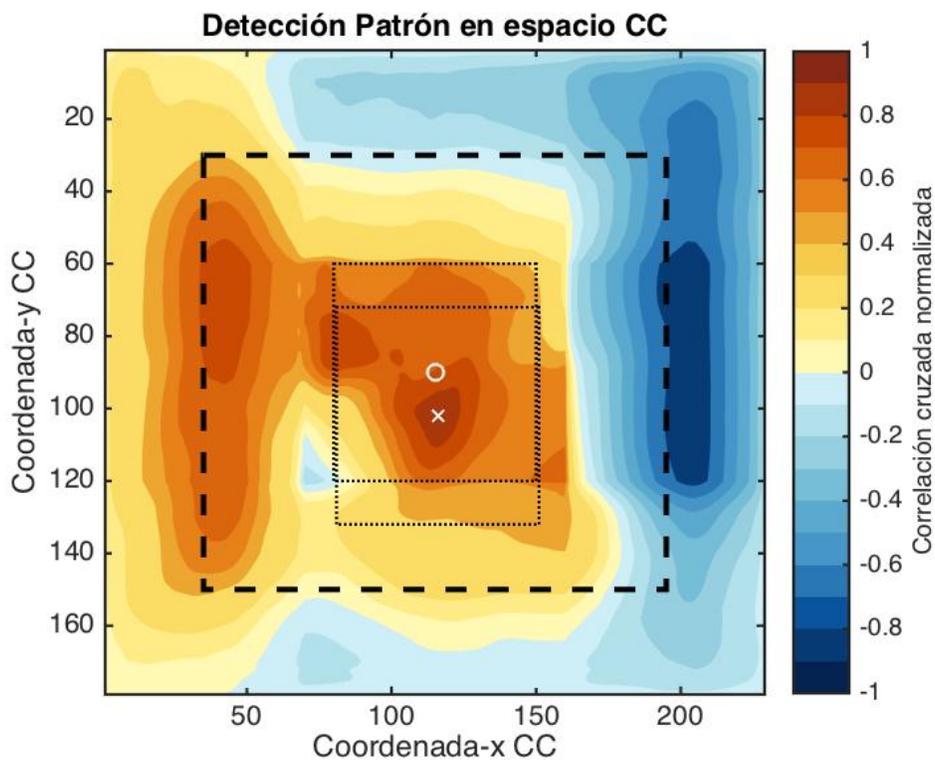


Figura 3.4: Matriz de correlación cruzada de la prueba realizada día 26 de octubre de 2014, 11:53 UTC. (Ver Fig. 3.3). Notación similar a Fig. (3.2).

3.2. Análisis de sensibilidad del método CCM

A continuación se presentan los resultados de los casos mencionados anteriormente en el Cuadro (2.2). La Fig. (3.5) muestra el diagnóstico de la magnitud (color) y dirección del viento (vector blanco para dirección instantánea, vector negro para dirección promedio post-QC) obtenida para todos los casos testeados, mientras que la Fig. (3.6) muestra las matrices de correlación cruzada normalizada de todos los casos. La Fig. (3.7) por su parte, muestra los Casos 1, 2, 3 y 4, esta vez desplazados en el tiempo en una ventana de 40 minutos.

- (a) **Variabilidad de alta frecuencia:** El caso 2.1, 2.2 y 2.3 de las Figs. (3.5, 3.6) muestra la transición temporal de la detección, en intervalos de 2 min. Cabe mencionar que la correlación cruzada se hizo entre dos cuadros sucesivos (30 s de intervalo). La validación de la observación dado el umbral correlación-velocidad (Ver Ec. 2.18) muestra amplio rechazo en las regiones de la imagen correspondiente a la banda de sombra y regiones de menor nubosidad, dado principalmente por la velocidad mínima. Sin embargo, hay zonas en la esquina superior-izquierda, en donde se detecta un máximo de velocidad no necesariamente asociado a la nubosidad, sino que bien puede originarse por la geometría del espejo – en el borde la capa nubosa tiende a mostrar movimiento muy grande – lo cual evidencia la importancia de una elección correcta de la región de búsqueda. La correlación cruzada móvil no es capaz de detectar muy bien la región de la banda de sombra, sin embargo hay variaciones en el patrón de correlación, dando a entender que la calidad del cálculo de desplazamiento no es homogéneo.
- (b) **Sensibilidad a la resolución:** El caso 3.1, 3.2 y 3.3 por su parte muestra que en general el método requiere un tamaño de patrón/grillado lo suficientemente fino como para detectar objetos estáticos o en movimiento (nubes, banda de sombra, etc.) y también lo suficientemente grueso como para eliminar lecturas espurias de desplazamiento provocado por la poca cantidad de píxeles usados en el cuadro patrón, con su consiguiente carencia de información esencial para distinguir correctamente los objetos desplazados.
- (c) **Estabilidad en el tiempo:** La sensibilidad temporal es mostrada en la Fig. (3.7). El comportamiento del método en magnitud es relativamente estable, logrando capturar cambios de magnitud importantes en el rango de minutos (Ver el Caso 2 y 3), y también en alta frecuencia. Sin embargo salvo en el Caso 3, el método subestima la magnitud con diferencias de hasta 1 ms^{-1} . En el caso de la dirección del viento, en general el desempeño de la dirección es también sesgado hacia la derecha aproximadamente 30° . Sin embargo, el Caso 2 es un caso donde se encuentran diferencias irreconciliables entre la dirección aparente detectada por el método CCM y la dirección obtenida por el sonda, mostrando ya una primera debilidad del algoritmo, que será revisada en la sección Discusión.

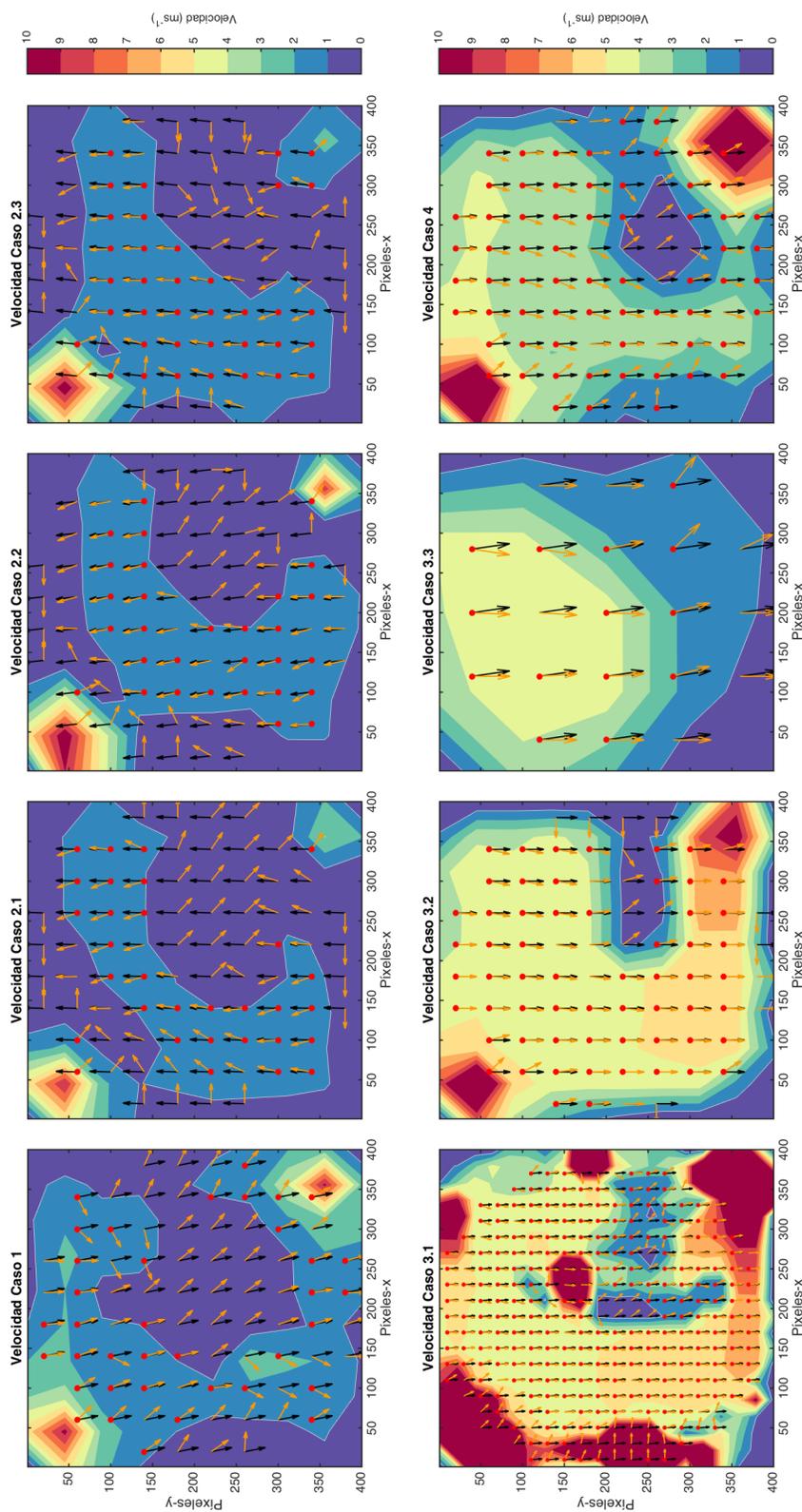


Figura 3.5: Análisis de Sensibilidad para Velocidades. Diagnóstico de la velocidad del viento usando ventanas móviles. En vector negro el promedio de las direcciones del viento, vector naranja es la dirección puntual del viento según el algoritmo CCM. Un contorno marca un cambio de 2 ms^{-1} en magnitud. Un punto rojo en el origen del vector marca la observación óptica que pasó el control de calidad dado por Ec. (2.18)

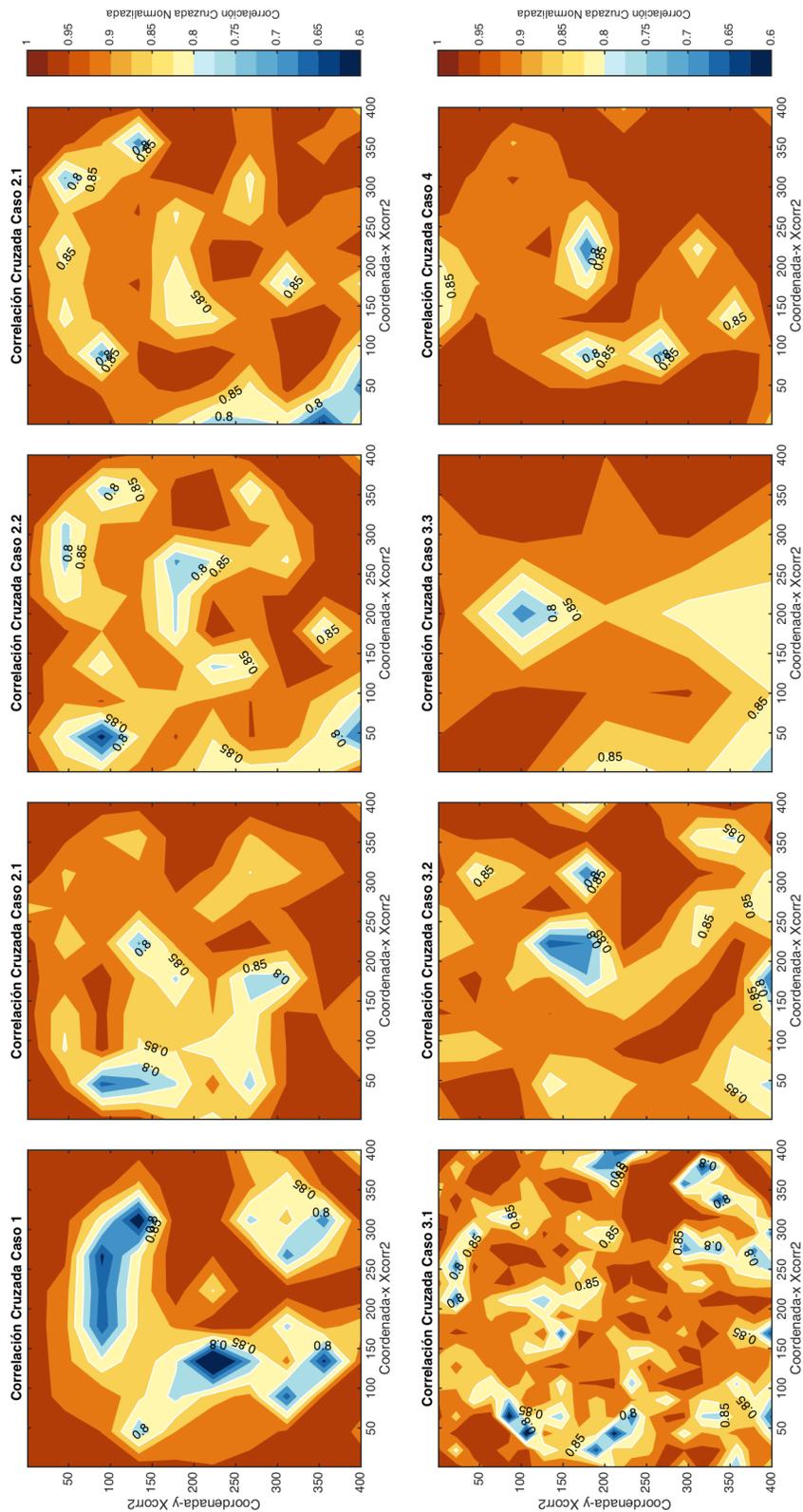


Figura 3.6: Análisis de Sensibilidad para la correlación cruzada, entre un Patrón ($t=0$) e Imagen ($t = 30$ s.). Valores inferiores a 0.6 son representados con el mismo color. Notar la barra de colores. La correspondencia de casos con fechas está en Tab. (2.2).

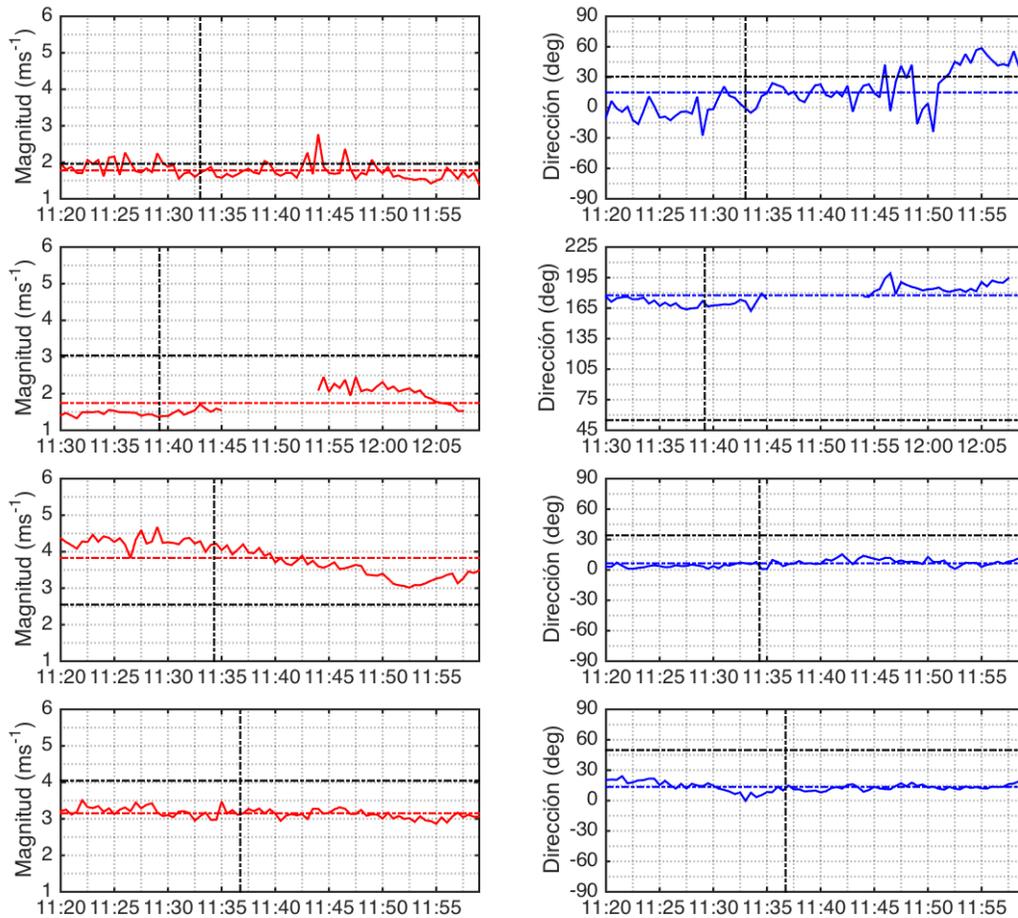


Figura 3.7: Resultados del análisis de sensibilidad. De arriba a abajo, Casos 1, 2, 3 y 4. Línea continua representa la observación por el método CCM. Línea punteada del color de la variable representa el promedio de ella y las líneas negras punteadas indican el valor y la posición temporal del radiosonda al llegar a la altura nubosa.

3.3. Desempeño del algoritmo en la base de datos

Se procedió además a realizar un procesamiento general de la base de datos, el cual es mostrado en la Fig. (3.9). Este gráfico no contiene ningún tipo de procesamiento, más allá del control de calidad explicitado antes (Ver Ec. 2.18). Sin embargo se realizó una comparación del dato óptico usando una ventana móvil de 15 min alrededor del tiempo del radiosondeo, y no del promedio general diario. Se puede notar un desempeño pobre en ambas variables, con muchos datos dispersos en una nube, lo cual evidencia que los criterios de control de calidad fueron demasiado suaves (Ver Tab. 3.2).

Sin embargo, se puede agregar *a posteriori* un segundo control de calidad, el cual activa

Caso #	Magnitud (m s^{-1})						Dirección (deg)				Sonda	
	μ	q_{50}	σ	B_i	$RMSE$	MAD	μ	σ	B_i	$RMSE$	Mag	Dir
1	2.1	1.5	1.9	0.1	1.9	0.4	348	40	-42	253	2.0	31
2.1	1.5	1.1	1.5	-1.5	2.1	0.1	182	68	127	175	3.0	55
2.2	1.6	1.2	1.5	-1.4	2.0	0.1	173	67	118	161	3.0	55
2.3	1.6	1.4	0.8	-1.4	1.6	0.1	186	67	131	158	3.0	55
3.1	5.0	4.8	2.2	2.4	3.3	0.7	355	41	-39	189	2.5	34
3.2	4.7	4.6	1.8	2.2	2.8	0.5	0	36	-34	174	2.5	34
3.3	3.0	3.6	1.4	0.5	1.4	0.9	351	36	-43	175	2.5	34
4	3.5	3.3	2.6	-0.5	2.6	0.8	356	36	-53	191	4.0	50

Cuadro 3.1: Resultados del análisis de sensibilidad promedio para las grillas. Se incorporan las observaciones puntuales del radiosonda de 12 UTC. Variables: μ es la media; σ desviación estándar; B_i sesgo con respecto a la observación; $RMSE$ raíz de error cuadrático medio; q_{50} mediana; MAD desviación absoluta de la mediana.

Grupo de Datos	Correlación		Significancia				Cantidad Datos
	Mag	Dir	Mag	Dir	Mag	Dir	
Datos QC1 (sin procesar)	0.006	-0.8	No	Sí	No	Sí	333
Datos QC2 (más exigente)	0.398	-0.76	Sí	Sí	Sí	Sí	160
Evento E_1 (dir), E_2 (mag)	0.926	0.249	Sí	Sí	Sí	Sí	62; 46
Evento conjunto $E_1 \cap E_2$	0.95	0.373	Sí	No	Sí	No	21
	Lineal	Angular	Monte-Carlo		t-Student		

Cuadro 3.2: Resultados de las pruebas de correlación sin procesar (QC1) y bajo el control de calidad nuevo (QC2). Probado bajo una prueba de Monte Carlo a 10000 remuestros y una prueba- t de Student y dos colas, ambas a 95% de confianza.

exigencias más rigurosas a los datos:

$$V_{inf} < V(i, j) < \lfloor \Delta H * f \rfloor \quad \& \quad 0.85 < CC(i, j) < 0.925 \quad \& \quad \Delta H < 1250\text{m} \quad (3.1)$$

Y además se pueden definir los siguientes eventos:

(a) E_1 (Buena dirección del viento): Umbral (3.1) & $|V_{d,o} - V_{d,s}| \leq 30^\circ$

(b) E_2 (Buena magnitud del viento): Umbral (3.1) & $|V_{m,o} - V_{m,s}| \leq 0.5\text{m s}^{-1}$

En donde la diferencia absoluta en E_1 es calculada usando estadística circular (Zar, 1984).

Usando el umbral QC2 (Ec. 3.1), se obtiene la Fig. (3.10), que evidencia que un filtro más fuerte en correlación además de una restricción en la altura nubosa mejora notablemente el cálculo (salida del modelo), pero aún no es suficientemente fuerte para garantizar una medición cercana a las observaciones. También está integrado en la Tab. (3.2). Para comprobar qué tan fuerte es la dependencia entre las variables magnitud-dirección, se realiza

un compuesto generado con las componentes de la probabilidad condicional. La Tab. (3.3) muestra los valores obtenidos de dicho compuesto, mientras que la Tab. (3.4) muestra los valores de a, b, c, d , necesarios para calcular las probabilidades condicionales. El porcentaje de exactitud del método es de $PC = 58.7\%$, el porcentaje de falsas alarmas es $FAR = P(E_2^c|E_1) = 66.1\%$, la detección correcta es $POD = P(E_1|E_2) = 45.6\%$ y el porcentaje de detección falsa es $F = P(E_1|E_2^c) = 35.9\%$. La versión inversa de estos estadísticos es $FAR2 = P(E_1^c|E_2) = 54.3\%$, $POD2 = P(E_2|E_1) = 33.8\%$ y $F2 = P(E_2|E_1^c) = 25.5\%$. En ambos casos el porcentaje de falsas alarmas (rechazo E_i dado un E_j correcto en $P(E_i|E_j)$) es alto, lo que sugiere que no necesariamente existe una causalidad en el acierto de la detección de la variable cuando la otra sí ha acertado previamente, aunque ligeramente la magnitud posee mejor desempeño *a priori* al determinar el compuesto de dirección posteriormente. La tasa de detección también sugiere que una dirección dentro del umbral QC2 permite detectar mejor a la magnitud. Por otra parte los errores de detección siguen siendo altos en comparación a los aciertos.

Evento	E_1	E_2	E_1^c	E_2^c
Probabilidad	38.8%	28.8%	61.2%	71.2%
Evento	$E_1 \cap E_2$	$(E_1 \cup E_2)^c$	$E_1^c \cap E_2$	$E_1 \cap E_2^c$
Probabilidad	13.1%	45.6%	15.6%	25.6%

Cuadro 3.3: Resultados de la prueba compuesta de probabilidad condicional. Estos cálculos fueron realizados frente a la cantidad de datos totales que pasaron QC2.

La prueba de significancia estadística usando el método de Monte Carlo a 95% de confianza y 10000 remuestreos y las distribuciones de la correlación obtenidas con este método son mostradas en la Fig. (3.8).

N = 160	E_2	E_2^c
E_1	a = 21	b = 41
E_1^c	c = 25	d = 73

Cuadro 3.4: Tabla de contingencia de detección de elementos. Los valores representan la cantidad de casos en que se detectaron las combinaciones de E_1, E_1^c, E_2, E_2^c

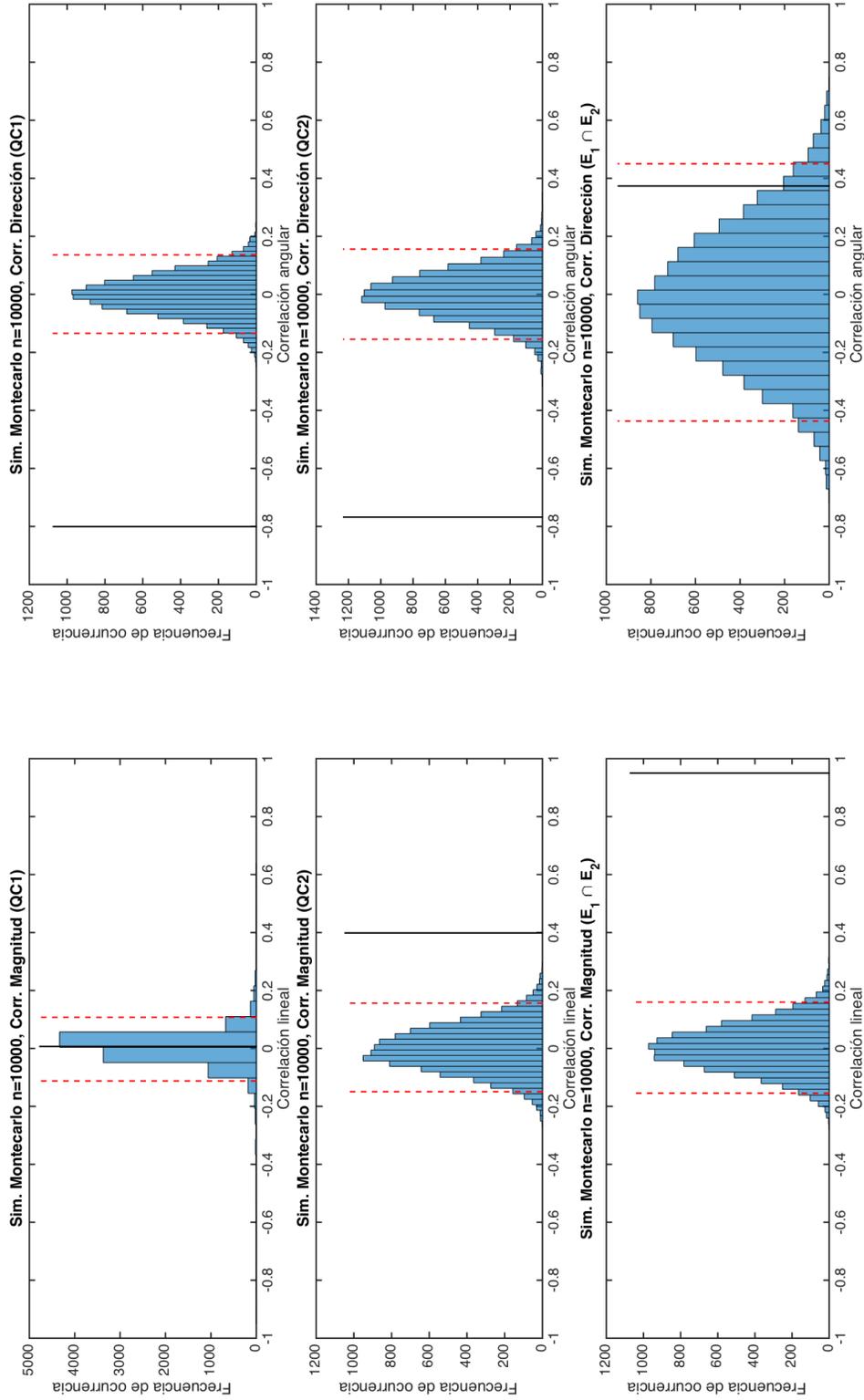


Figura 3.8: Análisis de Monte Carlo para significancia estadística de la correlación ($n = 10000$, $\alpha = 0.05$). Se desplegó sobre toda la base de datos. Línea roja punteada marca el percentil p2.5 y p97.5; línea negra marca el valor de correlación obtenido, respectivamente. De arriba a abajo: Datos QC1, Datos QC2, $E_1 \cap E_2$

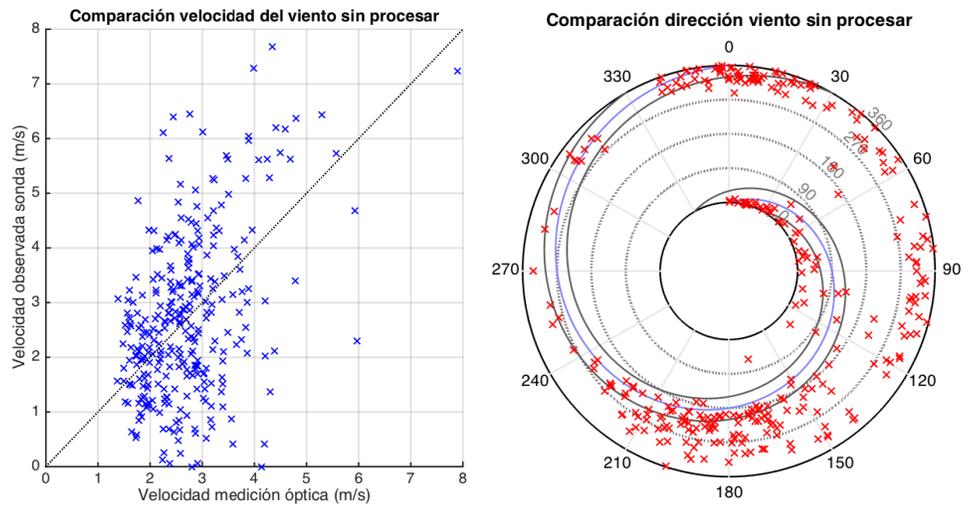


Figura 3.9: Salida de la comparación sonda-método CCM sobre toda la base de datos. (a) Dispersión lineal de magnitud del viento. (b) Dispersión circular de la dirección del viento, usando graficador de Fisher y Lee (1983) (ver detalles en Apéndice C): Eje toroidal: Sondeo, Eje poloidal: Modelo.

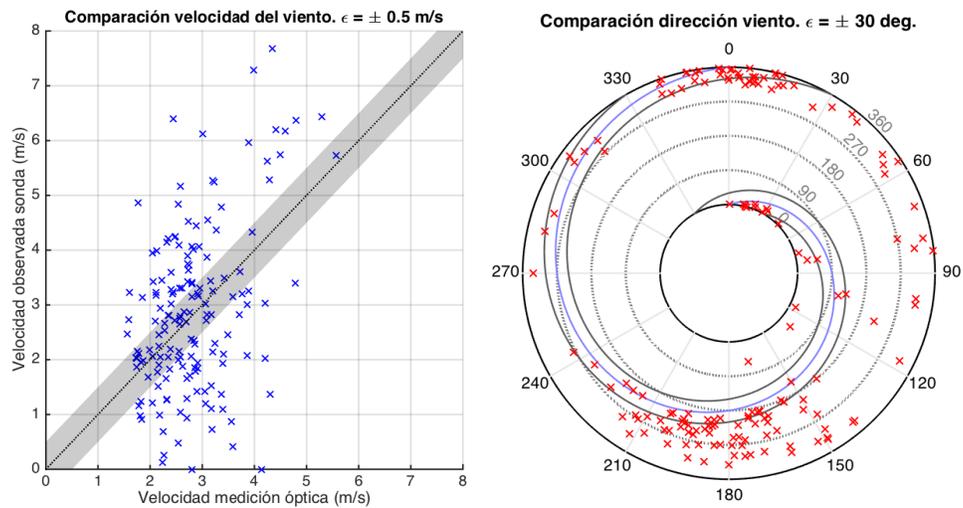


Figura 3.10: Salida de la comparación modelo-sonda sobre toda la base de datos, aplicado un umbral QC2 (Ec. 3.1). (a) Dispersión lineal de magnitud del viento. (b) Dispersión circular de la dirección del viento.

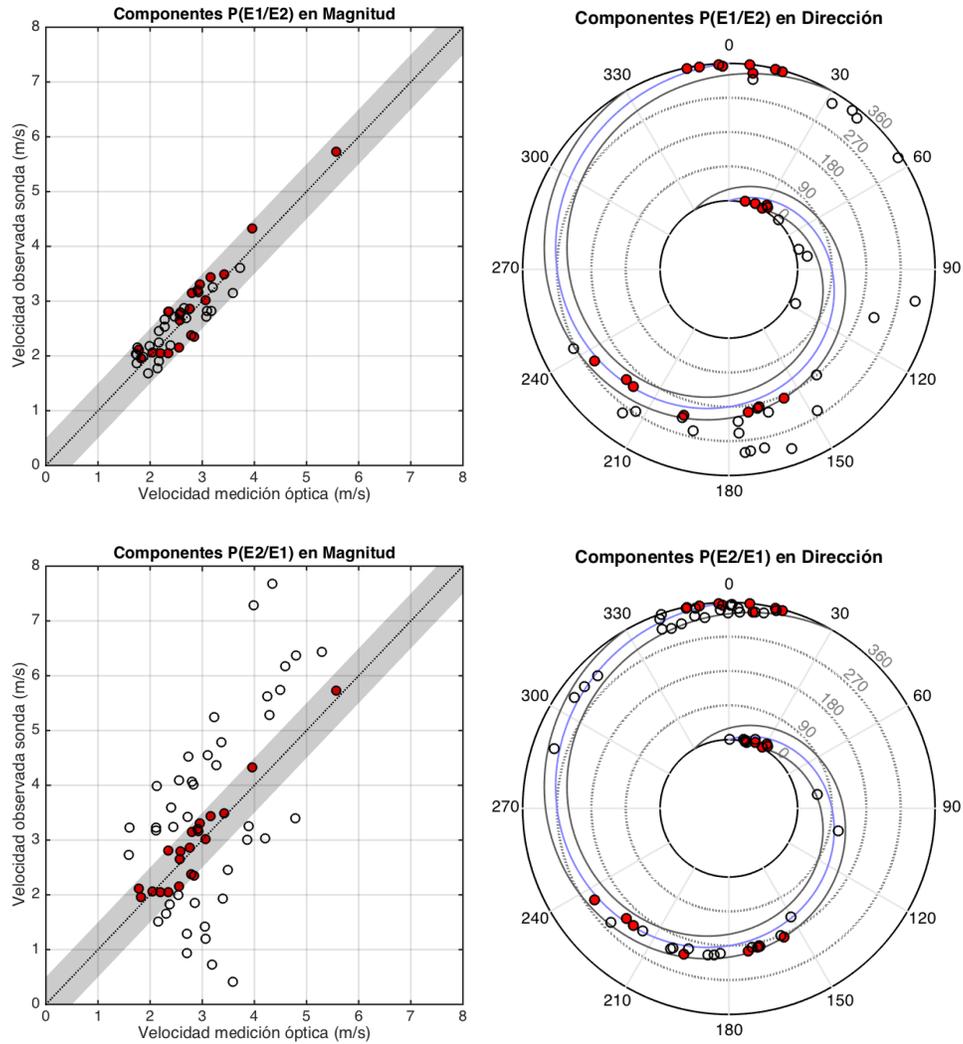


Figura 3.11: Comparación modelo-sonda de las componentes de la probabilidad condicional $P(E_i|E_j)$. (a) Dispersión de la magnitud del viento, (b) Dispersión circular de la dirección del viento. En ambos gráficos el punto sin relleno marca la probabilidad $P(E_j)$ mientras que los puntos rojos marcan la probabilidad $P(E_i \cap E_j)$. Arriba, los puntos sin relleno y rojos representan las probabilidades $P(E_2), P(E_1 \cap E_2)$, mientras que abajo las probabilidades representadas son $P(E_1), P(E_1 \cap E_2)$, respectivamente.

E_1 : Dirección a menos de 30° de distancia. E_2 : Magnitud a menos de 0.5 m s^{-1} de distancia.

Capítulo 4

Discusión

4.1. Efectividad del método CCM

Como se vio en el capítulo anterior, el método de la correlación cruzada es particularmente efectivo cuando se realiza el análisis sobre imágenes con alto contraste entre el objeto de seguimiento y el fondo (Ver Figs. 3.2 y 3.4). Sin embargo en dichos casos se usó una elección del patrón adecuada para la prueba, además de la región de búsqueda. El enfoque realizado en primer lugar para el análisis de sensibilidad, y luego utilizado para el procesamiento en lote (Ver Fig. 2.8) permite una ejecución totalmente desatendida del método, sin embargo desde los casos de ejemplo se comienza a notar ciertas diferencias (en algunos casos irreconciliables) entre las observaciones de radiosonda y las salidas del modelo propuesto. Puesto que en condición de nublado (nubes *Stratus* o *Stratocumulus* muy juntas), el contraste que se logra entre las diferentes características propias de la forma de la nube se reduce drásticamente (Ver Fig. 4.1), lo cual introduce errores de detección del movimiento (en un comentario similar al descrito por [Chow et al. \(2011\)](#)).

Otro aspecto que requiere ser repasado es el de las suposiciones iniciales en el problema geométrico: (recapitulando)

1. La curvatura de la Tierra es despreciable
2. La cubierta nubosa es una única capa plana, con una altura constante H_{cloud} sobre toda la imagen

La primera condición no requiere mayor detalle, puesto que un ángulo de 50° (en cénit, aproximadamente el límite de la banda de sombra) y una altura de 1000 m en la nubosidad, obtiene una visión horizontal de aproximadamente 839 m, y usando el radio terrestre (6.378×10^6 m), se obtiene un ángulo subtendido de 7×10^{-3} deg, que claramente hace despreciable este efecto.

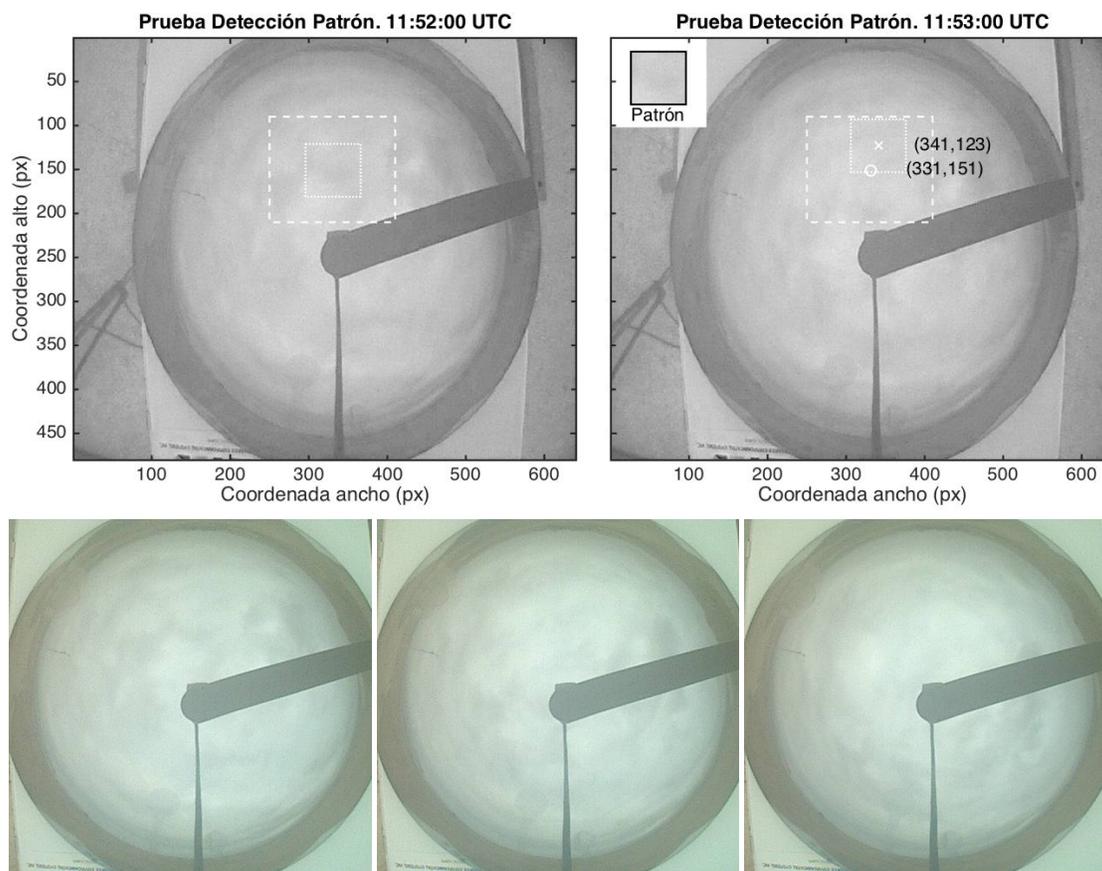


Figura 4.1: (a) Imagen inicial de la prueba de detección y seguimiento de patrones, día 4 de abril de 2014, 11:52 UTC. (b) Imagen adelantada 60 s (11:53 UTC). Círculo y cruz blanca marcan las posiciones inicial y final del seguimiento. Cuadro de línea discontinua marca el área de búsqueda en ambas imágenes, mientras que el cuadro pequeño con línea punteada marca la selección del patrón y la detección, respectivamente. Abajo, Imágenes RGB a las 11:52, 11:54 y 11:56 UTC respectivamente.

Por otro lado, la segunda suposición inicial es más cuestionable, en el sentido que hemos apreciado casos donde el método no logra detectar bien el movimiento debido a que hay capas de nubes que se mueven en distintas direcciones dentro de la misma imagen, lo cual puede ser provocado por perturbaciones en la corriente de aire arriba, o bien por la superposición de dos tipos distintos de nubes a distinta altura que se solapan en la imagen. Tampoco se tienen datos de validación ni de altura nubosa en cada punto de la imagen, por lo tanto requiriendo de esta simplificación. Además se realizan los promedios para validar o rechazar los datos, con su consecuente pérdida de información. La falla en validación de dirección podría ser causado porque el globo sonda se encontraba alrededor de estas perturbaciones, muchas de las cuales no satisfacen el criterio de control de calidad. Una propuesta para cambiar la suposición inicial de altitud es usar un segundo equipo TSI separado a una distancia conocida del primero, y realizar un análisis estereofotogramétrico que permita

resolver la altura $H_{cloud}(i, j)$ para cada píxel.

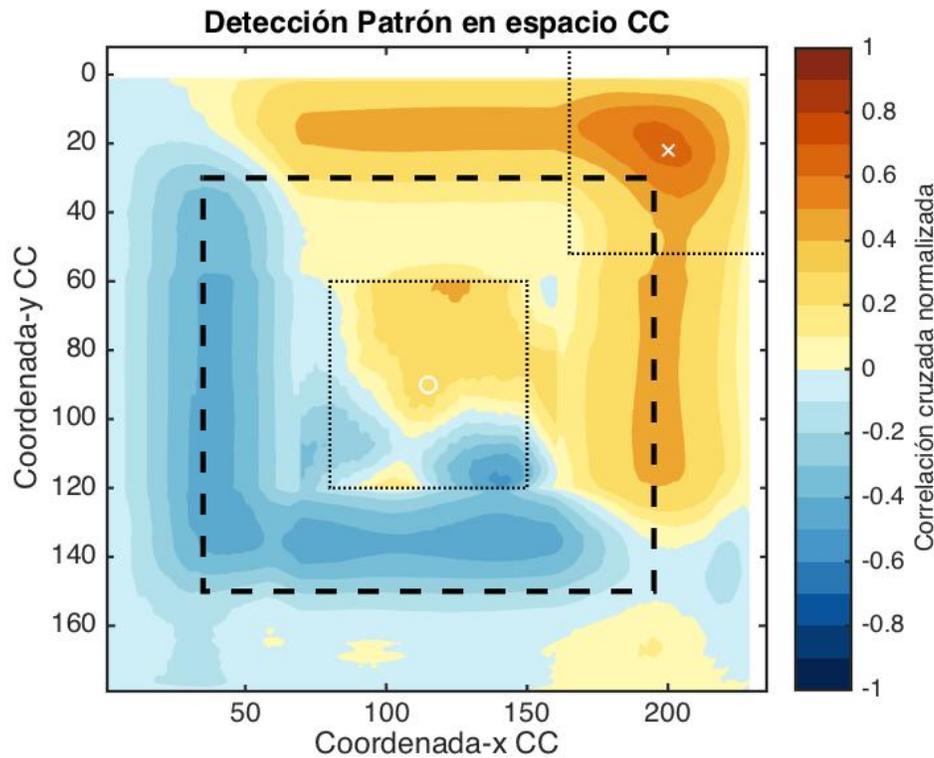


Figura 4.2: Matriz de correlación cruzada de la prueba realizada día 4 de abril de 2014, 11:53 UTC. (Ver Fig. 3.1). Cuadro de línea discontinua marca la región de búsqueda – área en que la correlación cruzada usa todos los píxeles del patrón – y los cuadros con línea punteada marcan el origen (marcado con punto blanco) y la detección (cruz blanca) de la máxima correlación. Notar las dimensiones de la matriz (patrón + área de búsqueda - 1) .

Los umbrales de control de calidad QC1 no fueron suficientes para filtrar las salidas del modelo que tienen fuertes discrepancias con los datos del radiosondeo, sin embargo es suficientemente bueno (mostrado en los casos de sensibilidad) para rechazar en varias oportunidades la zona de la banda de sombra y el poste que sostiene la cámara del TSI. El uso de un filtro digital 2D de mediana también ayuda a eliminar bastante bien los vectores espurios de velocidad puntual. En general se evidencia un sesgo en los datos a través del tiempo (aprox. 1 ms^{-1} en magnitud, -35° en dirección), no obstante se evidencian casos en que existen discrepancias irreconciliables con la validación. Cuando se usan los umbrales QC2, mejora la significancia estadística y los valores de las correlaciones entre las variables, pero los valores siguen siendo bajos, evidenciando la debilidad de detección del método CCM.

Del desempeño general del modelo se puede observar la reducción drástica de datos desde las observaciones sin procesar hasta el evento conjunto $E_1 \cup E_2$, y las probabilidades condicionales muestran un error de falsa alarma alto, con valores de 66% y 54% respectivamente ($P(E_2^c|E_1)$ y $P(E_1^c|E_2)$). La detección correcta de magnitud y dirección corresponde al 45%

y 33 %, claramente inferiores a la tasa de falsas alarmas (FAR).

Por lo tanto, por parte de las características propias del método CCM implementado en esta Habilitación Profesional, el algoritmo no supera la validación con radiosonda, debido a la necesidad de imponer exigencias muy fuertes a los datos obtenidos, que reducen drásticamente la cantidad de observaciones disponibles, y por lo tanto de una utilidad reducida dada por las condiciones del cielo y el cumplimiento de las suposiciones iniciales. Requeriría un cambio en el uso de bandas espectrales de la cámara (para obtener información en cielos muy nubosos), además de un método de transformación de los patrones respecto a la geometría del espejo, cuya ejecución no considera el efecto de compresión y expansión de las nubes (tanto por el efecto del espejo, como también por turbulencia).

4.2. Cuestiones relacionadas a los datos de entrada

La ineffectividad de reconocer el movimiento en condiciones muy nubosas (véase Fig. 4.1) está delimitado por el bajo contraste de los píxeles adyacentes en el patrón en la banda roja. Dado que el equipo TSI incorpora un sistema que modifica el rango dinámico de cada banda para ajustarlo a los 8-bit por color (especificaciones técnicas se pueden encontrar en Long *et al.*, 2001), resulta difícil ajustar un factor de multiplicación fijo a cada banda. Una aproximación podría ser que el método CCM se amplíe y permita usar imágenes en RGB completo y no solamente en banda roja, de modo de capturar el movimiento en las tres bandas de color, y completar la información del desplazamiento que alguna de ellas no pueda determinar (véase una separación por bandas en Fig. 4.3).

La banda de sombra y el poste no presentaron mayores dificultades en su eliminación, usando el umbral QC1. Sin embargo hay pérdida de datos en estas regiones, por lo que otra forma de optimizar este método es la eliminación digital de dichos objetos usando interpolación areal (la cual no se pudo realizar debido al tiempo disponible), además de la incorporación al umbral de control de calidad de la posición del Sol en la imagen, que puede afectar la medición de correlación cruzada 2D.

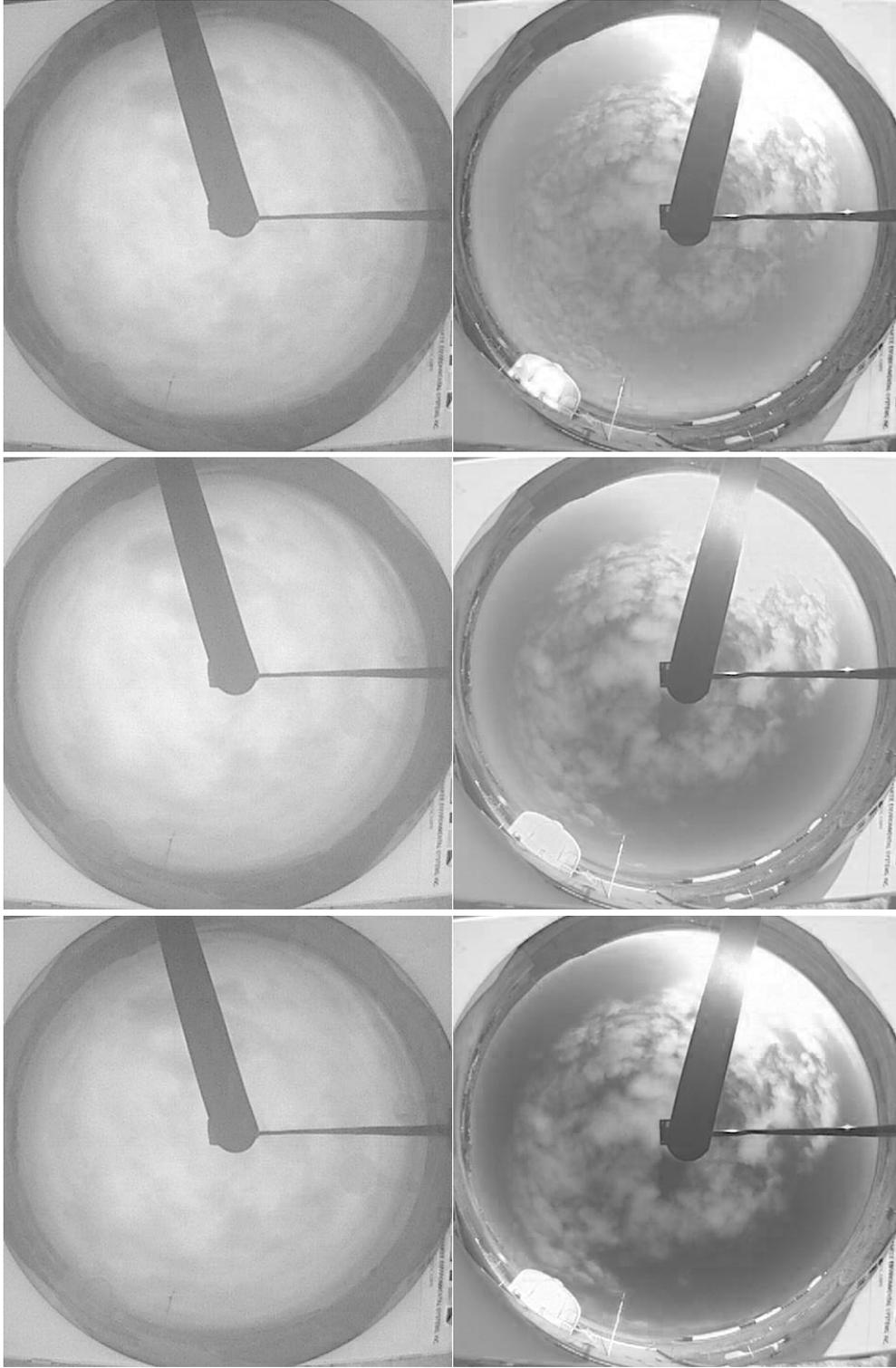


Figura 4.3: Descomposición en escala de grises, canales RGB imágenes del día 4 de abril de 2014, 11:54 UTC (arriba) y 27 de diciembre de 2013, 11:27 UTC (abajo). De izquierda a derecha: Rojo, Verde, Azul

Capítulo 5

Conclusión

Basado en los resultados y el despliegue del presente trabajo, se puede concluir que se puede crear un modelo que permite calcular desplazamientos y velocidades de un set de imágenes secuenciales obtenidas con un equipo Total-Sky-Imager, cuya ejecución es medianamente intensiva computacionalmente, y permite seguir de forma adecuada patrones con alto contraste entre el fondo y el objeto (nube delimitada del cielo) y moderada a mala cuando la calidad de la imagen impide detectar patrones distintivos en la nubosidad (cubierta nubosa muy densa).

En los casos de ejemplo utilizados se logran sesgos de magnitud entre -1.5 y 2.4 m s^{-1} y desviaciones estándar promedio de 1.7 m s^{-1} . La dirección, por su parte, muestra desviaciones estándar promedio de 49° , y además muestra sesgos de dirección variados, en grupos de -42° y de 125° , este último haciendo irreconciliable la validación direccional en casos donde la imagen no permite tener el alto contraste requerido por el método de la correlación cruzada.

La validación sobre toda la base de datos ejecutada (18 meses entre Enero-2014 y Junio-2015), mostró que el método de control de calidad inicial (Correlación >0.8 y $V_{mag} \in [1 \text{ m s}^{-1}, f * (H_{cloud})]$) no fue suficiente para asegurar que las observaciones dadas por el modelo se ajusten a su par dado por el radiosondeo, con correlaciones entre magnitud de 0.006 (no significativa) y -0.8 (significativa pero no útil) en dirección. Aumentando las exigencias ($0.85 < \text{Correlación} < 0.925$, $V_{mag} \in [1, f * (H_{cloud})]$ y $H_{cloud} < 1250\text{m}$) se logra mejorar la correlación entre las variables (0.398 en magnitud y -0.76 en dirección, ambas significativas). El caso en que se cumplen los eventos E_1 (Δ Dirección $< 30^\circ$) y E_2 (Δ Magnitud $< 0.5 \text{ m s}^{-1}$), tiene una probabilidad de 13.1% . El porcentaje máximo de falsa alarma ocurre cuando se tiene *a priori* una dirección dentro del umbral; el cual tiene el valor de 66.1% , cuya interpretación es: de cada 100 casos de magnitud cuya dirección está dentro

del umbral, 66 no acierta en ella. El valor mayor de detección correcta es de 45.6% (misma condición anterior).

Con todos estos antecedentes se puede concluir finalmente que el método de la correlación cruzada para calcular velocidad de nubes bajas presenta buenos resultados (salvo sesgamientos) para imágenes de alta calidad, y discrepancias en fotografías de baja calidad – en algunos casos irreconciliables – entre las observaciones y el modelo, las cuales no permiten garantizar la validación completa de la base de datos. Cabe mencionar que el artículo guía de *Chow et al.* (2011) no realiza una validación general con radiosondeo, por lo tanto no hay forma de comparar si el desempeño se ajusta a la literatura base.

Una forma de mejorar este problema y lograr superar la etapa de validación es adaptar el método CCM a un uso de imágenes en RGB completo, y usar un método para tener información completa de la altura de cubierta nubosa (por ejemplo la estereofotogrametría) para poder determinar los cambios verticales en las nubes, desestimados acá por las suposiciones iniciales aplicadas. Queda para futura investigación realizar un sistema adaptativo de detección de patrones, que logre detectar cambios compuestos en el contraste, basados en las tres componentes RGB, y logre filtrar elementos como el Sol.

Bibliografía

- Berens, P. (2009). CircStat: A MATLAB Toolbox for circular statistics. *Journal of Statistical Software*, 31(1):1–21.
- Bourke, P. (1996). Cross correlation. *Cross Correlation, Auto Correlation—2D Pattern Identification*.
- Briechle, K. y Hanebeck, U. D. (2001). Template matching using fast normalized cross correlation. En *Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls*, pp. 95–102. International Society for Optics and Photonics.
- Cereceda, P. (2000). Los atrapanieblas, tecnología alternativa para el desarrollo rural. *Medio Ambiente y Desarrollo*, 16(4):51–56.
- Chow, C. W., Urquhart, B., Lave, M., Dominguez, A., Kleissl, J., Shields, J., y Washom, B. (2011). Intra-hour forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed. *Solar Energy*, 85(11):2881–2893.
- Clark, D. A. y Wilson, F. W. (1996). The marine stratus initiative at san francisco international airport. Technical report, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- Dim, J., Murakami, H., Nakajima, T., Nordell, B., Heidinger, A., y Takamura, T. (2011). The recent state of the climate: Driving components of cloud-type variability. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres (1984–2012)*, 116(D11).
- Donaldson, R., Dyer, R. M., y Kraus, M. J. (1975). An objective evaluator of techniques for predicting severe weather events. En *Bulletin of the American Meteorological Society*, volumen 56, pp. 755–755. Amer. Meteorological Society 45 Beacon St., Boston, MA 02108-3693.
- Eastman, R. y Warren, S. G. (2013). A 39-yr survey of cloud changes from land stations worldwide 1971–2009: Long-term trends, relation to aerosols, and expansion of the tropical belt. *Journal of Climate*, 26(4):1286–1303.
- Finley, J. P. (1884). Tornado predictions. *American Meteorological Journal*, 1:85–88.

- Fisher, N. I. y Lee, A. J. (1983). A correlation coefficient for circular data. *Biometrika*, 70(2):327–332.
- Garratt, J. (1994). *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press.
- Garreaud, R. y Muñoz, R. (2004). The diurnal cycle in circulation and cloudiness over the subtropical southeast pacific: A modeling study. *Journal of climate*, 17(8):1699–1710.
- Garreaud, R. y Rutllant, J. (2006). Variabilidad atmosférica de alta frecuencia en el borde oriental del anticiclón del pacífico sureste. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 29(1):6.
- Ghonima, M., Urquhart, B., Chow, C., Shields, J., Cazorla, A., y Kleissl, J. (2012). A method for cloud detection and opacity classification based on ground based sky imagery. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(11):2881–2892.
- Hamill, T. M. y Neerkorn, T. (1993). A short-term cloud forecast scheme using cross correlations. *Weather Forecasting*, 8(4):401–411.
- Hartmann, D. L., Ockert-Bell, M. E., y Michelsen, M. L. (1992). The effect of cloud type on Earth's energy balance: Global analysis. *Journal of Climate*, 5(11):1281–1304.
- Janeiro, F. M., Carretas, F., Kandler, K., Wagner, F., y Ramos, P. M. (2014). Advances in cloud base height and wind speed measurement through stereophotogrammetry with low cost consumer cameras. *Measurement*, 51:429–440.
- Jolliffe, I. y Stephenson, D. (2003). *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. Wiley.
- Leese, J. A., Novak, C. S., y Clark, B. B. (1971). An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. *Journal of Applied Meteorology*, 10(1):118–132.
- Lewis, J. (1995). Fast normalized cross-correlation. En *Vision interface*, volumen 10, pp. 120–123.
- Li, Q., Lu, W., y Yang, J. (2011). A hybrid thresholding algorithm for cloud detection on ground-based color images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(10):1286–1296.
- Long, C., Slater, D., y Tooman, T. P. (2001). *Total sky imager model 880 status and testing results*. Pacific Northwest National Laboratory Richland, Wash, USA.
- Muñoz, R. C., Zamora, R. A., y Rutllant, J. A. (2011). The coastal boundary layer at the eastern margin of the southeast pacific (23.4 s, 70.4 w): Cloudiness-conditioned climatology. *Journal of Climate*, 24(4):1013–1033.

- Nyquist, H. (1928). Certain topics in telegraph transmission theory.
- Painemal, D., Garreaud, R., Rutllant, J., y Zuidema, P. (2010). Southeast Pacific stratocumulus: High-frequency variability and mesoscale structures over San Felix Island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(3):463–477.
- Painemal, D. y Zuidema, P. (2010). Microphysical variability in southeast Pacific Stratocumulus clouds: synoptic conditions and radiative response. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(13):6255–6269.
- Peng, Z., Yu, D., Huang, D., Heiser, J., Yoo, S., y Kalb, P. (2015). 3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers. *Solar Energy*, 118:496 – 519.
- Remund, J., Perez, R., y Lorenz, E. (2008). Comparison of solar radiation forecasts for the USA. En *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 1–9.
- Reynolds, D. W., Clark, D. A., Wilson, F. W., y Cook, L. (2012). Forecast-based decision support for San Francisco International Airport: A next generation prototype system that improves operations during summer stratus season.
- Rozendaal, M. A., Leovy, C. B., y Klein, S. A. (1995). An observational study of diurnal variations of marine stratiform cloud. *Journal of Climate*, 8(7):1795–1809.
- Shields, J., Karr, M., Burden, A., Johnson, R., Mikuls, V., Streeter, J., y Hodgkiss, W. (2009). Research toward multi-site characterization of sky obscuration by clouds, Final Report for Grant N00244-07-1-009, Marine Physical Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego. Technical report, Technical Note 274.
- Swets, J. A. (1986). Indices of discrimination or diagnostic accuracy: their ROCs and implied models. *Psychological bulletin*, 99(1):100.
- Tapakis, R. y Charalambides, A. (2013). Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review. *Solar Energy*, 95:392 – 430.
- Warren, S., Hahn, C., London, J., Chervin, R., Jenne, R., Colorado Univ., B., Colorado Univ., B., y National Center for Atmospheric Research, B. (1988). *Global distribution of total cloud cover and cloud type amounts over the ocean*.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*, volumen 100. Academic press.
- Wittenberg, A. T., Rosati, A., Lau, N.-C., y Ploshay, J. J. (2006). GFDL's CM2 global coupled climate models. Part III: Tropical Pacific climate and ENSO. *Journal of Climate*, 19(5):698–722.

Wittmann, M., Breitzkreuz, H., Schroedter-Homscheidt, M., y Eck, M. (2008). Case studies on the use of solar irradiance forecast for optimized operation strategies of solar thermal power plants. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(1):18–27.

WMO (1974). Manual on codes. Technical report.

WMO (2002). Guide to the GCOS Surface and Upper Air Networks: GSN and GUAN. WMO, Geneva. WMO-TD, 1106.

Wood, R. (2012). Stratocumulus clouds. *Monthly Weather Review*, 140(8):2373–2423.

Zar, J. (1984). *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall.

Apéndice A

Notas sobre la propagación de errores

El método utilizado en el presente trabajo mostró ser muy sensible a la calidad de los datos de entrada. Sin embargo, hay otras fuentes de error inherentes a los procesos computacionales que involucran los cálculos de ecuaciones y análisis de píxeles. A continuación algunos de ellos.

1. **Cálculo rápido de la correlación cruzada normalizada (NCC):** Recordemos que la correlación cruzada normalizada se obtiene a partir de dos matrices (Imagen y Patrón) de la siguiente manera (revisar Metodología, 2.3):

$$X_{u,v} = \frac{\sum_{i,j} (I_{i,j} - \bar{I}_{u,v})(T_{i-u,j-v} - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i,j} (I_{i,j} - \bar{I}_{u,v})^2 \sum_{i,j} (T_{i-u,j-v} - \bar{T})^2}} \quad (\text{A.1})$$

Sin embargo se usó para optimizar recursos computacionales una variante de esta función, que efectúa el cálculo de Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) y sumas precomputadas (Briechle y Hanebeck, 2001; Lewis, 1995). Este proceso entrega una aproximación de la NCC que para efectos prácticos permite la detección más veloz del patrón en la imagen; no obstante no es perfecto el cálculo.

2. **Geometría del problema y CCM:** Si bien la transformación geométrica usada es capaz de asignar a cada píxel una posición en el espacio, no hemos considerado aquí el efecto de la transformación de área en el tiempo, mientras las nubes se mueven de un lado a otro (visto desde el espejo). Esto supone una gran incertidumbre y una mayor probabilidad de detecciones falsas o erróneas del movimiento.

Por otra parte, movimientos lejos del centro de la imagen aportan un mayor grado de desacierto debido a que una detección equivocada del punto destino del patrón en pocos píxeles aporta aquí un mayor desplazamiento que en el centro o zonas contiguas. Aquí no hemos considerado tampoco el efecto de los movimientos en escala sub-píxel, que el método no es capaz de resolver.

3. **Uso del promedio:** Para calcular las velocidades finales para cada foto se realiza un promedio de la velocidad en la imagen usando un filtro digital de mediana 2D y aplicando los criterios de control de calidad correspondientes. Sin embargo la reducción a un solo dato promediado puede ser un problema en el caso de que ciertos valores escapados no puedan ser filtrados, y por lo tanto modificando drásticamente el valor final.

El efecto de (2) se puede realizar usando un ejemplo, considerando el conjunto de ecuaciones de la sección 2.2 (Problema Geométrico, Metodología). Si usamos una altura típica de una nube baja (700 m), y movemos 1 píxel cerca del centro [desde (220,220) a (221,221)] tenemos un desplazamiento de 3.98 m; y en un caso lejos del centro [desde (380,380) a (381,381)] el desplazamiento obtenido es de 42.15 m. Claramente el error de detección en la escala de pocos píxeles pueden afectar varios metros dependiendo de su ubicación.

Apéndice B

Regresión lineal para calibración de

φ

La ecuación en el sentido de los mínimos cuadrados para realizar el ajuste de φ es la siguiente:

$$A^{8 \times 5} X^{5 \times 1} = B^{8 \times 1} \quad (\text{B.1})$$

$$X \approx (A^t A)^{-1} A^t B \quad (\text{B.2})$$

Los superíndices de la primera ecuación son el tamaño de las matrices y vectores empleados. En este caso A representa la matriz de preobservaciones, X es el vector de coeficientes para el modelo polinómico de grado 4 a determinar. B corresponde a las observaciones angulares obtenidas usando la Tab. (B.1).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & r_1 & r_1^2 & r_1^3 & r_1^4 \\ 1 & r_2 & r_2^2 & r_2^3 & r_2^4 \\ 1 & r_3 & r_3^2 & r_3^3 & r_3^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & r_8 & r_8^2 & r_8^3 & r_8^4 \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \vdots \\ \varphi_8 \end{pmatrix}$$

Donde r_i corresponde a las distancias radiales al centro de la imagen de posición (u, v) (en unidades de píxeles).

$$r_i = \sqrt{(x_i - u)^2 + (y_i - v)^2} \quad (\text{B.3})$$

S (cm)	d (cm)	$\varphi_e = \sin^{-1}(d/R)$ (deg)	P_x (px)	P_y (px)	r_i (px)
0	0	0	335	234	0
2.5	2.5	6.27	385	231	50.09
5.0	4.96	12.53	430	227	95.26
7.5	7.37	18.81	471	224	136.37
10.0	9.68	25.05	507	222	172.42
12.5	11.89	31.34	536	218	201.63
15.0	13.95	37.61	560	215	225.80
17.5	15.84	43.86	579	212	244.99

Cuadro B.1: Observaciones realizadas usando marcas en la banda de sombra del TSI. S corresponde al arco de circunferencia subtendido, d es la proyección de S en la horizontal. Se incluyen las coordenadas de los puntos sobre la imagen (P_x, P_y) además de las distancias radiales r_i . Los cálculos mostrados están truncados a dos decimales. Más información en Fig. (2.4). Ampliación de la Tab. (2.1).

El polinomio a ajustar queda definido como:

$$\varphi_e = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 \quad (\text{B.4})$$

En donde los valores de los coeficientes son los siguientes:

$$a_0 = 80.82 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

$$a_1 = 1.91 \times 10^{-3} \text{ rad px}^{-1}$$

$$a_2 = 7.23 \times 10^{-6} \text{ rad px}^{-2}$$

$$a_3 = -48.88 \times 10^{-9} \text{ rad px}^{-3}$$

$$a_4 = 160.95 \times 10^{-12} \text{ rad px}^{-4}$$

Cabe destacar que también los valores fueron truncados para propósitos de presentación y los ángulos mostrados fueron adecuadamente convertidos a radianes para realizar el cálculo. Las rutinas incorporadas hacia el final del presente documento integran el cálculo sin truncamiento, más que el propio de la doble-precisión (`double`) de MATLAB®.

Apéndice C

Gráficos toroidales 2D (o “gráficos de rosquilla”), de Fisher & Lee (1983)

El artículo de Fisher y Lee (1983) muestra el desarrollo de una función *correlación circular*, la cual permite evaluar datos que no tienen una preferencia en su valor (ángulos, por ejemplo), calculada de forma eficiente usando arreglos trigonométricos. Una forma de observar dos variables circulares propuesta en el documento es un gráfico bidimensional que representa la proyección de una superficie toroidal (“rosquilla”) la cual es cortada en el plano normal al eje de rotación. Una línea de correlación circular $\rho = 1$ corresponde a una espiral en este gráfico. La ventaja de una presentación toroidal es que el dato graficado no sufre saltos dados por la periodicidad propia de las mediciones angulares (0, 360 grados), y su comprensión es más natural (eje toroidal, véase Fig. C.1).

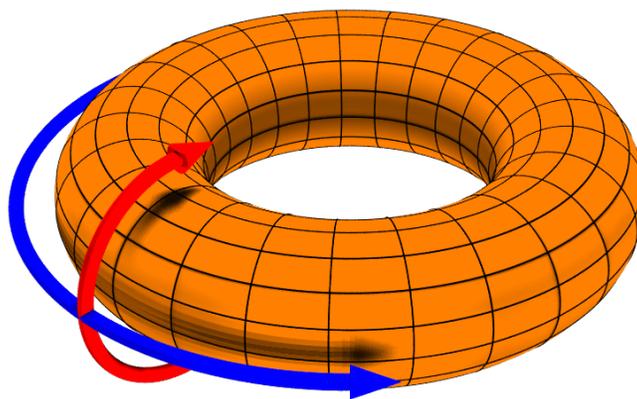


Figura C.1: Representación de las coordenadas tóricas: La flecha azul representa la dirección toroidal, mientras que la flecha roja representa la dirección poloidal. Fuente: Wikimedia Commons. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Toroidal_coord.png

Se construyó una función MATLAB® la cual permite realizar dichos diagramas con vectores de entrada, la cual está transcrita al final de este apéndice.

Las ecuaciones que rigen las gráficas son las siguientes: dado θ, φ (grados), al igual que las funciones trigonométricas. r, R son respectivamente los radios de la circunferencia interior y exterior:

$$R_1 = \frac{(R-r) * \varphi}{360} + r \tag{C.1}$$

$$x = R_1 \sin \theta \tag{C.2}$$

$$y = R_1 \cos \theta \tag{C.3}$$

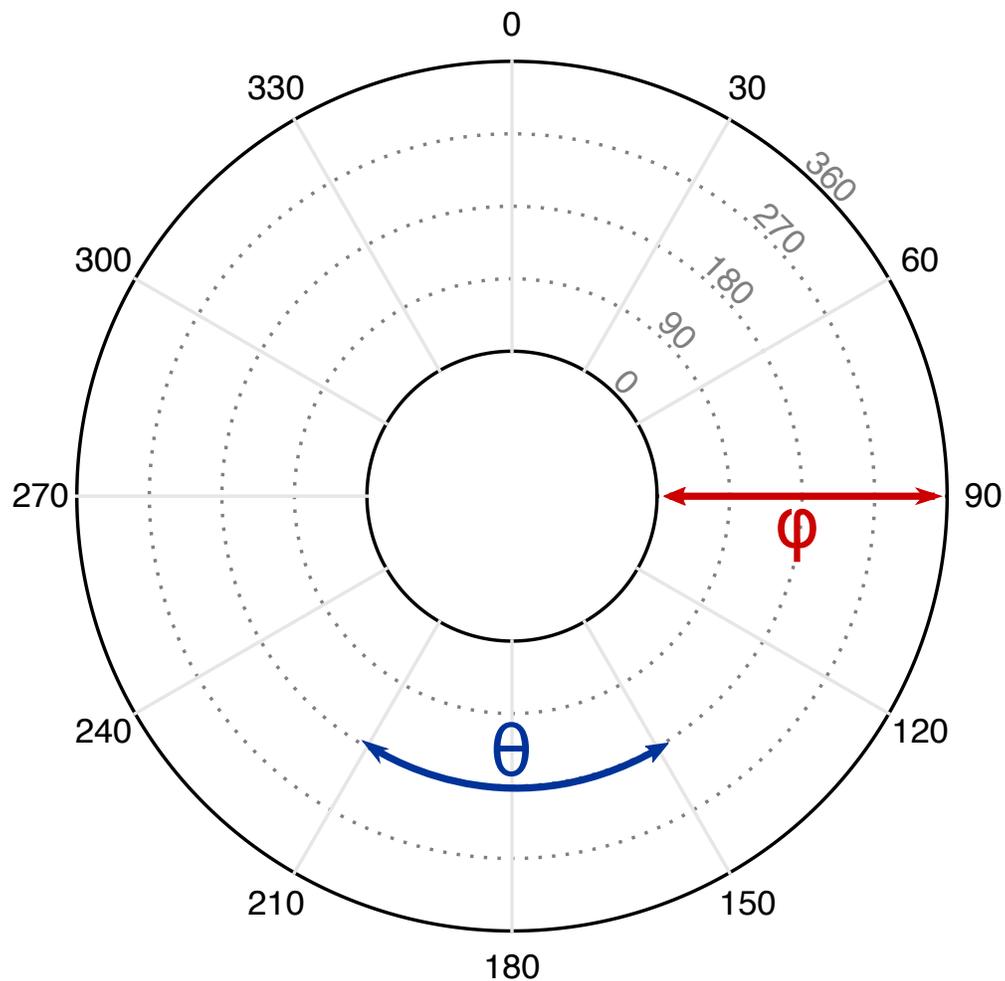


Figura C.2: Esquema gráfico toroidal 2D de Fisher y Lee (1983). La coordenada toroidal es θ (sentido horario), y la coordenada poloidal es φ . Fue realizado usando la función `anillo.m` adjuntada en esta sección.

```

function h = anillo(varargin)
%ANILLO Grafico de rosquilla 2D (o anillo) angulo-angulo.
% Grafica datos de dos angulos theta, phi en un eje en forma de anillo
% (representa una superficie toroidal cortada por un plano normal al eje
% revolucion, vista desde arriba)
%
% El eje toroidal corresponde al angulo theta (grados)
% El eje poloidal corresponde al angulo phi (grados)
%
% (c) David Aguilera, 2016. Basado en el paper de Fisher & Lee (1983),
% el codigo "annulus" de Matt Fig, escrito en el foro web de Matlab,
% y el codigo de "Polar", de MathWorks.
%
% URL:
% http://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/3540-ring-annulis-patch
%
% ARTICULO BASE
%
% Fisher, N., & Lee, A. (1983). A Correlation Coefficient for Circular Data.
% Biometrika, 70(2), 327-332. DOI: 10.2307/2335547
%
% FORMAS DE USO
%
% Uso: h = anillo(theta,phi), con theta, phi vectores en grados con
% angulos entre 0 y 360.
% Uso 2: h = anillo(theta,phi,estilo), donde estilo es un formato de linea
% Uso 3: h = anillo(theta,phi,est,ang), donde ang es el angulo donde poner
% la leyenda del angulo poloidal. Por defecto es 45 grados.
%
% La variable h es un puntero, que permite definir u obtener propiedades
% con los comandos SET y GET respectivamente (R2014a o inferior), o
% notacion con puntos (ej. h.LineStyle, R2014b o posterior).

[ejeactual, argumentos, numargumentos] = axescheck(varargin{:});

if numargumentos == 3;% nargs == 3
[theta, phi, estilo_linea] = deal(argumentos{1 : 3});
theta_e = 45;
elseif numargumentos == 2;

```

```

theta = argumentos{1};
phi = argumentos{2};
estilo_linea = 'auto';
theta_e = 45;
elseif numargumentos == 4;
[theta,phi,estilo_linea,theta_e] = deal(argumentos{1 : 4});
end
%Generacion de los anillos borde del limite
t = linspace(0,2*pi, 500);
r = 2; %radio peque-no
R = 6; %radio grande
x = r*cos(t);
y = r*sin(t);
xm = (r+(R-r)/2)*cos(t);
ym = (r+(R-r)/2)*sin(t);
X = R*cos(t);
Y = R*sin(t);

ejeactual = newplot(ejeactual);
siguiente = lower(get(ejeactual, 'NextPlot'));
estado_fijar = ishold(ejeactual);

angulo_texto = get(ejeactual, 'DefaultTextFontAngle');
tipografia = get(ejeactual, 'DefaultTextFontName');
tamagno_texto = get(ejeactual, 'DefaultTextFontSize');
grosor_texto = get(ejeactual, 'DefaultTextFontWeight');
unidades = get(ejeactual, 'DefaultTextUnits');
set(ejeactual, ...
'DefaultTextFontAngle', get(ejeactual, 'FontAngle'), ...
'DefaultTextFontName', get(ejeactual, 'FontName'), ...
'DefaultTextFontSize', get(ejeactual, 'FontSize'), ...
'DefaultTextFontWeight', get(ejeactual, 'FontWeight'), ...
'DefaultTextUnits', 'data');

if ~estado_fijar
%% Ejecutamos esta parte si solo no hemos graficado antes la grilla
hold(ejeactual,'on')
P = patch([x X],[y Y],'w','linestyle','non','facealph',1,...
'HandleVisibility','off','Parent', ejeactual);

```

```

L(1) = line(x,y,'color','k','HandleVisibility','off','Parent', ejeactual);
L(2) = line(X,Y,'color','k','HandleVisibility','off','Parent', ejeactual);
L(3) = line(xm,ym,'color',[0.5 0.5 0.5],'linestyle',':','...
        'HandleVisibility','off','Parent', ejeactual);
line((r+(R-r)/4)*cos(t),(r+(R-r)/4)*sin(t),'color',[0.5 0.5 0.5],...
      'linestyle',':','HandleVisibility','off','Parent', ejeactual);
line((R-(R-r)/4)*cos(t),(R-(R-r)/4)*sin(t),'color',[0.5 0.5 0.5],...
      'linestyle',':','HandleVisibility','off','Parent', ejeactual);

% Creamos las lineas angulares y los textos en theta ()
for i = 0:30:330
    cst = cosd(i);
    snt = sind(i);
    X1 = r*cst; X2 = R*cst; X3 = (R+0.5)*cst;
    Y1 = r*snt; Y2 = R*snt; Y3 = (R+0.5)*snt;
    line([X1 X2], [Y1 Y2], 'LineStyle', '-', 'Color', [0.9 0.9 0.9],...
          'LineWidth', 1, 'HandleVisibility', 'off', 'Parent', ejeactual);
    text(Y3,X3, num2str(i),'horizontalalignment','center',...
          'HandleVisibility', 'off', 'Parent', ejeactual);
end

% Creamos los textos en phi
cst2 = cosd(theta_e);
snt2 = sind(theta_e);

phi_e = [0 90 180 270 360];
phi_ev = [20 110 200 290 380];
Rtag = (((R-r).*phi_ev)./360) + r;
X4 = Rtag.*cst2; Y4 = Rtag.*snt2;
for j= 1:length(phi_e)
    text(Y4(j),X4(j),num2str(phi_e(j)),'horizontalalignment','center',...
          'handlevisibility','off','parent',ejeactual,'color',[0.5 0.5 0.5],...
          'rotation',360-theta_e);
end

%pasos finales para permitir usos posteriores
view(ejeactual, 2);
axis(ejeactual, R * [-1, 1, -1.15, 1.15]);
end

```

```

% Reseteamos variables

set(ejeactual, ...
'DefaultTextFontAngle', angulo_texto , ...
'DefaultTextFontName', tipografia , ...
'DefaultTextFontSize', tamagno_texto, ...
'DefaultTextFontWeight', grosor_texto, ...
'DefaultTextUnits', unidades );

%Escalar los angulos theta, de modo de moverlos hacia adelante del anillo
%primario.

R1 = (((R-r).*phi)./360) + r;

%Graficamos los puntos. Basado en el codigo de "polar"

if strcmp(estilo_linea, 'auto')
hhh = plot(R1.*sind(theta),R1.*cosd(theta),'parent',ejeactual);
else
hhh = plot(R1.*sind(theta),R1.*cosd(theta),estilo_linea,'parent',ejeactual);
end

if nargin == 1
h = hhh;
end

%Reactivamos los ejes para poder superponer graficos y escribir titulos

if ~estado_fijar
set(ejeactual, 'DataAspectRatio', [1, 1, 1]);
axis(ejeactual, 'off');
set(ejeactual, 'NextPlot', siguiente);
end
set(get(ejeactual, 'XLabel'), 'Visible', 'on');
set(get(ejeactual, 'YLabel'), 'Visible', 'on');

```

Apéndice D

Soporte computacional utilizado

Se realizó el cálculo en tres ordenadores portátiles, por un tiempo máquina total aproximado de 2000 horas (equivalentes en un computador de 1 CPU virtual a 2.0 GHz).

Especificación	Macbook Pro '12	Dell Inspiron 3421	Acer Aspire V5
Procesador	Intel Core i5 2.4-2.9 GHz	Intel Core i5 1.8-2.4 GHz	Intel Core i3 1.4 GHz
Subprocesos	Dos	Dos	Dos
Disco duro	1 TB	500 GB	150 GB
Sistema Operativo	Apple Mac OS 10.11	Microsoft Windows 10	Ubuntu 14.04

Cuadro D.1: Soporte computacional utilizado para la ejecución del método de la correlación cruzada.

Se utilizó un sistema en red local para trabajar con los datos en paralelo y el paquete de cálculo numérico MATLAB®, con el módulo para procesamiento de imágenes (ing. *Image Processing Toolbox*) y el módulo de computación en paralelo (ing. *Parallel Computing Toolbox*).

Imágenes procesadas	Días procesados	Días Válidos QC1	Días Válidos QC2
613 286	515	333	160

Cuadro D.2: Cantidad de imágenes procesadas en el soporte computacional anteriormente descrito. Los días con datos válidos corresponden a días en los cuales en torno al radiosonda (± 15 min) se encuentra un promedio de la magnitud y dirección del viento en el umbral descrito en el trabajo.

Apéndice E

Código fuente de algunos programas destacados

```
function [varargout] = encontrarglobo2(varargin)
%ENCONTRARGLOBO2
% Funcin que usa dos bases de datos: Radiosondeos, Altura Nefobasmetro.
% Entrega el tiempo de llegada del globo y la altura ms cercana grabada.
% Adems entregar la magnitud y la direccin del viento en base de datos
% de dicho acercamiento.
% Esta funcin encuentra dicha interseccin basada en la altura en vez del
% tiempo.
%
% Entrada:
% * dia: una fecha matlab con un da y una hora
% * tolerancia: una hora de tolerancia en formato hora matlab.
%       Se puede construir usando datenum(0,0,0,a,b,c);
% * ch (opcional), time (opcional) y sondeo (opcional): precarga
%       nefobasmetro y radiosondeo
% * depurar (opcional): escriba un 1 si desea depurar la salida.
%
% Salida:
% * altura: altura en metros sobre el terreno donde se encuentra la primera
%       nube.
% * tiempo: fecha matlab del acercamiento de la nube. (radiosonda)
% * deltat: diferencia de tiempo en segundos desde la locacin de la altura
%       en base de datos con el tiempo efectivo del acercamiento del globo
% * mag: magnitud del viento a altura dada
```

```
% * dir: direccin del viento a altura dada
%
% David Aguilera Riquelme - 14 de marzo 2016
% Bases de datos (c) Ricardo Muoz Magnimo.
%
% Cambios:
% 18-mayo-2016: agregada tolerancia de tiempo. Reparado primer trmino
% altitud. Clculo de la media mvil con 21 elementos sobre la altura
% 19-mayo-2016: correccin del tiempo a altura
% Mayo-Junio: informacin de depuracin.
% Julio: acceso a la depuracin desde afuera

if nargin == 2
dia = varargin{1};
tolerancia = varargin{2};
load datasondeoantodc3dbtxt.mat
load cheights.mat
depurar = 0;
elseif nargin == 3;
dia = varargin{1};
tolerancia = varargin{2};
load datasondeoantodc3dbtxt.mat
load cheights.mat
depurar = varargin{3};
elseif nargin == 6
dia = varargin{1};
tolerancia = varargin{2};
ch = varargin{3};
time = varargin{4};
sondeo = varargin{5};
depurar = varargin{6};
elseif nargin == 5
dia = varargin{1};
tolerancia = varargin{2};
ch = varargin{3};
time = varargin{4};
sondeo = varargin{5};
depurar = 0;
else
```

```

error('Num argumentos de entrada incorrecto')
end

tson = zeros(847,1);
for z = 1:847
tson(z) = sondeo{z}.time;
end
%posicin del sonda en la base de datos: P1. Busca si hay observacin en el
%umbral de tolerancia
P1 = find(dia - tolerancia < tson & tson < dia + tolerancia,1,'first');
if isempty(P1)
%control de proceso: si no hay sonda en el periodo
disp('Aviso: No hay sonda en el umbral dado de tolerancia. Saliendo...')
varargout{1} = NaN; % altura
varargout{2} = NaN; % tiempo
varargout{3} = NaN; % delta t
varargout{4} = NaN; % magnitud
varargout{5} = NaN; % direccin
return
end

Ti = sondeo{P1}.time_sec; %Segundos del lanzamiento.
Height = sondeo{P1}.Height_m - 115;
Time = datenum(0,0,0,0,0,Ti) + tson(P1);
%Time: tiempo UTC desde el timestamp, de la obs.
if depurar
fprintf('Fecha del inicio del sonda: %s\n',datestr(Time(1)));
end
U=sondeo{P1}.u_mps;
V=sondeo{P1}.v_mps;
WS=sondeo{P1}.FF_mps;
P=sondeo{P1}.P_hPa;
DD=sondeo{P1}.DD_dgr;

% detectamos ahora la altura en donde se intersectan las bases de datos.
% esto es, buscamos la altura en el Nefo que coincida ms cerca con el
% sonda.

% Pven es el ndice en CHeights donde se da una ventana de 15 minutos

```

```

% en la cual el radiosonda est presente.

Pven = find((tson(P1)) <= time & ...
time <= (tson(P1) + datenum(0,0,0,0,15,0)));
%disp(length(Pven))
if isempty(Pven)
disp('Ventana 15 min no contiene observaciones en Nefo. Cambiando...')
Pven = find(tson(P1) <= time & time <= (tson(P1)+datenum(0,0,0,0,30,0)));
if isempty(Pven)
disp('Error: No ha sido posible calcular la altura del nefobasmetro.')
%control de proceso: si no hay deteccin de nubes, se pondr valores
%grandes
varargout{1} = Inf; % altura
varargout{2} = NaN; % tiempo
varargout{3} = NaN; % delta t
varargout{4} = NaN; % magnitud
varargout{5} = NaN; % direccin
return
end
end

ALTven = ch(Pven,1);
[~,I1,I2] = minimadistancia(ALTven,Height);
PNefo = I1 + Pven(1) - 1;
PGlo = I2;
if isempty(PNefo) || isempty(PGlo)
disp('Error: No ha sido posible obtener la interseccin Nefo/Sonda.')
%control de proceso: si no hay deteccin de nubes, se pondr valores
%grandes
varargout{1} = Inf; % altura
varargout{2} = NaN; % tiempo
varargout{3} = NaN; % delta t
varargout{4} = NaN; % magnitud
varargout{5} = NaN; % direccin
return
end

% I1 e I2 contienen las posiciones en las cuales tanto el Nefo como el
% Sonda tienen la altura donde se intersectan por primera vez en el da

```

```

% seleccionado

% Ahora queremos promediar con ventana mvil en altura (50 metros de
% diametro entre observaciones)

ALTnefo = ch(PNefo,1);
fprintf('Altura del nefobasmetro: %5.1f m.\n',ALTnefo);
ALTsonda = Height(PGlo) + 25;

if isempty(Height(PGlo))
disp('Error: No ha sido posible calcular la altura del sonda.')
%control de proceso: si no hay deteccin de nubes, se pondr valores
%grandes
varargout{1} = Inf; % altura
varargout{2} = NaN; % tiempo
varargout{3} = NaN; % delta t
varargout{4} = NaN; % magnitud
varargout{5} = NaN; % direccin
return
end

%%%%%%%%%%%%% DEBUGGING %%%%%%%%%%%%%%

if depurar == 1;
if exist('./DepurarSonda','dir') ~= 7;
mkdir('./DepurarSonda');
end

[agno,mes,dia,~,~,~] = datevec(dia);
fechate = sprintf('%02.0f-%02.0f-%4.0f',dia,mes,agno);
isoda = sprintf('%4.0f%02.0f%02.0f',agno,mes,dia);

disp('Inicio de depuracin cdigo Encontrar Globo 2...')
fprintf('Altura inicial: %4.2f\n',Height(1));

fig1 = figure;%( 'visible', 'off');
data2k = find(Height < 1500);
plot(U(data2k),Height(data2k), 'r'); grid minor; hold on;
plot(V(data2k),Height(data2k), 'b');

```

```

legend('U','V');
h1 = line([-10 10],[ALTnefo ALTnefo]);
set(h1,'color','black','linestyle','--');
h2 = line([-10 10],[ALTnefo+50 ALTnefo+50]);
set(h2,'color','black','linestyle','--');
title(['Componentes U,V sondeo da ',fechate])
%ARa = find(abs(Height - ALTsonda)<25);
%plot(U(ARa),Height(ARa),'k','linewidth',3);
%plot(V(ARa),Height(ARa),'k','linewidth',3);
xlabel('Valor velocidad (ms^{-1})'); ylabel('Altura sobre suelo (m)');
formatearpulgadas;
print('-dpng',[ './DepurarSonda/WndCmp',isoda]);
close(fig1);

T = sondeo{P1}.T_K - 273;
Td = sondeo{P1}.TD_K - 273;

fig2 = figure;%('visible','off');
plot(T(data2k),Height(data2k),Td(data2k),Height(data2k)); grid minor; hold on;
legend('T','Tdew')
title(['Temp. y Temp. roco da ',fechate]);
%plot(T(ARa),Height(ARa),'k','linewidth',3);
%plot(Td(ARa),Height(ARa),'k','linewidth',3);

minT = floor(min([min(T(data2k)) min(Td(data2k))])/10)*10;
maxT = ceil(max([max(T(data2k)) max(Td(data2k))])/10)*10;

h1 = line([minT maxT],[ALTnefo ALTnefo]);
set(h1,'color','black','linestyle','--');
h2 = line([minT maxT],[ALTnefo+50 ALTnefo+50]);
set(h2,'color','black','linestyle','--');

xlabel('Temperatura (deg C)'); ylabel('Altura sobre suelo (m)');
formatearpulgadas;
print('-dpng',[ './DepurarSonda/Temp',isoda]);
close(fig2);

fig3 = figure;%('visible','off');
Tpot = ((T+273).*((P./P(1)).^(0.286)))-273;

```



```

veloU = nanmean(U(abs(Height - ALTsonda) < 50));
veloV = nanmean(V(abs(Height - ALTsonda) < 50));

MAG = nanmean(WS(abs(Height - ALTsonda) < 50));
DIR = wrapTo360(270 - (180/pi)*angle(veloU(:) + 1j*veloV(:)));
tiempo = Time(PGlo);

[~,~,~,Hs,Ms,Ss] = datevec(tiempo - tson(P1));
deltat = Hs*3600 + Ms*60 + Ss;

%% Evaluamos el output final
%altura, tiempo, deltat, mag, dir
varargout{1} = ALTnefo;
varargout{2} = Time(PGlo);
varargout{3} = deltat;
varargout{4} = MAG;
varargout{5} = DIR;

end

function [varargout] = findnear(serie,patronbusq)
%FINDNEAR
% Encuentra un patron de bsqueda en una serie o matrix, que est a la
% menor distancia entre el punto y el valor encontrado.
%
% Uso: [I] = FINDNEAR(A, patron); [I,J] = FINDNEAR(A, patron);
%
% Entrada:
%   A: una matriz o vector donde encontraremos un resultado
%   patron: un nmero. El resultado ser el punto ms cercano al patr.
%
% Salida I, o bien [I,J]: ndices de la bsqueda
%
% DAR, 12/enero/2016

if nargin == 1
K = abs(serie-patronbusq);
varargout{1} = find(K == min(K(:)),1,'first');

```

```
else
K = abs(serie-patronbusq);
[A,B] = find(K == min(K(:)),1,'first');
varargout{1} = A;
varargout{2} = B;
end
end

function [valordif, posiciona, posicionb] = minimadistancia(A,B)
%MINIMADISTANCIA
% Resta dos vectores (A - B) que tienen distintas dimensiones.
% Esta operacin est definida como una resta de vector con escalar, para
% cada elemento de B. El resultado identifica el lugar donde est la mnima
% distancia (punto de interseccin) entre ambos vectores, incluso si no
% tienen valores repetidos.
% Si varios puntos alcanzan el mnimo, se escoger solo el primero.
%
% Entrada:
% a: un vector de dimensiones (1,M)
% b: un vector de dimensiones (1,N)
%
% Salida:
% valordif: valor de la menor diferencia absoluta.
% pa: indice en el vector a donde se posiciona esta mnima diferencia
% pb: dem para el vector b
%
% David Aguilera R. 19 de mayo 2016
a = A(:);
b = B(:);
%M = length(A);
N = length(B);
dif = zeros(1,N);
posA = zeros(1,N);
for i = 1:N
pu = b(i);
if isnan(pu);
dif(i) = NaN;
posA(i) = NaN;
continue
```

```
end
vd = abs(a - pu);
dif(i) = min(vd);
BUSQ = findnear(vd,min(vd));
if isempty(BUSQ)
dif(i) = NaN;
posA(i) = NaN;
continue
end
posA(i) = BUSQ;
clear pu vd BUSQ;
end
mdif = findnear(dif,min(dif(:)));
valordif = dif(mdif);
posiciona = posA(mdif);
posicionb = mdif;
end
```