



Identificación De Sitios Potenciales Para La Observación Astronómica Usando Detección Remota.

Daniel Arbeláez Cardona

Maestría en Física

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Instituto de Física
Universidad de Antioquia
Medellín
2019

Dirigido por:
Esteban Silva Villa

Índice general

1. Introducción	1
2. Marco Teórico	3
2.1. El Papel de la Atmósfera	3
2.2. El Clima en la Región	5
2.3. Condiciones para la observación astronómica	6
2.4. Clasificación de cielos despejados	7
3. Descripción de los datos	9
3.1. Datos satelitales	9
3.1.1. GOES-13	10
3.1.2. GOES-16	11
3.2. Datos tomados en tierra	12
4. Descripción y validación de la metodología	15
4.1. Análisis con GOES-13	15
4.2. Análisis con GOES-16	18
4.2.1. ABI Clod Mask	18
4.2.2. Metodología para evaluación de sitios	21
5. Sitios potenciales para la observación astronómica	29
5.1. Fracción de nubosidad mensual	29
5.2. Cantidad de noches despejadas	31
5.3. Sitios potenciales en Colombia	32
5.3.1. Altiplanicie cundiboyacense	32
5.3.2. Laguna de la Cocha	34
5.3.3. Sierra Nevada de Santa Marta	35
5.4. Sitios en Colombia encontrados en otros trabajos	36
5.5. Sitios de interés en Antioquia	37
5.6. Sitios potenciales fuera de Colombia	38
5.6.1. Andes Ecuatorianos	38
5.6.2. Andes Venezolanos	39
5.7. Análisis de los resultados	40
5.8. Cambios en la definición	42
6. Conclusiones	47

A. Medidas meteorológicas en Colombia	49
A.1. Gráficos de precipitación anual-mensual	49
A.2. Mapas de variables meteorológicas	50
B. Uso de Python en la lectura de imágenes de GOES-16	55
B.1. Cargar datos de una imagen	55
B.2. Visualización	57
B.3. Seleccionar una región dadas sus coordenadas	58
B.3.1. Visualización de la región seleccionada	58
B.3.2. Selección de puntos con coordenadas específicas	59
Bibliografía	63

Capítulo 1

Introducción

La luz proveniente de las estrellas y demás cuerpos celestes debe atravesar la atmósfera de La Tierra para llegar a nuestros ojos o telescopios. En su camino, la luz es afectada por la refracción al cambiar de medio, es decir al entrar a la atmósfera la luz cambia su dirección de propagación (fenómeno que no es constante debido a la turbulencia atmosférica), o simplemente es bloqueada por las nubes, lo que condiciona en gran medida la observación astronómica al comportamiento de la atmósfera. Por esta razón, para la búsqueda de sitios adecuados para realizar observaciones astronómicas, o si se desea instalar un observatorio, es necesario realizar un estudio detallado de las condiciones atmosféricas de la región de interés.

La caracterización de las condiciones meteorológicas se puede realizar usando diferentes estrategias. Dichas estrategias incluyen la observación y medición hecha desde tierra y/o satélite, la implementación de modelos atmosféricos y/o el análisis de bases de datos de parámetros climáticos, con el fin de estudiar el comportamiento de diferentes variables (e.g. temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, entre otras). Esto se debe hacer a distintas escalas de tiempo, pues estas cantidades físicas pueden tener gran variabilidad espacial y temporal debido a factores topográficos, además de sus componentes diurnos y estacionales normales.

En Colombia existen diferentes instituciones que se encargan de monitorear variables climáticas, tal como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Sin embargo, el estudio del cielo y la atmósfera para la observación astronómica en Colombia ha sido escaso. Brieva (1985) realizó observaciones del cielo entre 1979 y 1981 en tres instantes de la noche, con continuidad interrumpida, anotando el porcentaje de nubosidad notado a simple vista. Las observaciones se realizaron en cuatro puntos de los Andes colombianos con el fin de encontrar la cantidad de noches despejadas en cada uno e identificar cuál sería un potencial sitio de observación. Brieva encontró que, de los puntos analizados, el más adecuado se ubica en el parque Natural de los Nevados, en la cordillera central, con un número de noches despejadas al año entre 130 y 250. Tres décadas después, Pinzón et al. (2015) analizaron imágenes en infrarrojo del sistema Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) sobre diferentes sitios en Colombia, Ecuador y Venezuela, para encontrar los puntos en la región con mayor cantidad de noches despejadas al año. En dicho estudio, los autores encontraron que el mejor sitio para la observación astronómica en Colombia se encuentra en la Sierra Nevada de Santa Marta, con alrededor de 72 noches despejadas al año. Dado que estos estudios se realizaron con tres décadas de diferencia, no se tuvieron en cuenta el cambio factores como el cambio poblacional, los cambios dados por el calentamiento global, o cualquier otro tipo de estudios que puedan dar información sobre la relación (o las diferencias) entre los diferentes sitios analizados por los autores.

Un estudio similar, pero enfocado a la observación en longitudes de microondas, fue realizado

por Chaparro Molano et al. (2017). A partir de medidas de estaciones meteorológicas, Chaparro Molano et al. hicieron una búsqueda de sitios apropiados para la astronomía en el milimétrico y sub-milimétrico en sitios con altas elevaciones (por encima de 2000 metros sobre el nivel del mar). Sus resultados indican que de los sitios estudiados, aquellos con mejores condiciones atmosféricas para la astronomía en microondas se encuentran sobre la altiplanicie cundiboyacense, en el Valle de Ubaté y Valle del Sol. No obstante, su trabajo se enfocó en analizar las condiciones de la atmósfera durante el día, mientras que la astronomía en el visible solo puede hacerse en la noche, debido a la presencia del sol sobre el horizonte.

A parte de los estudios mencionados, no se han publicado más trabajos de este tipo en Colombia. Estudios relacionados se han realizado en diferentes partes del mundo.

Gacal et al. (2018) estudiaron la fracción de cielo despejado sobre el observatorio de Manila (Filipinas) usando imágenes desde tierra entre el 2015 y 2016. Los resultados de Gacal et al. mostraron que, durante las épocas de alta humedad la fracción del cielo despejado es menor al 40 %, mientras que durante las épocas de baja humedad dicha fracción supera el 40 % de noches despejadas. Además, las observaciones mostraron que la cantidad de nubes que cubren el cielo disminuye a medida que avanza la noche. Hidayat et al. (2012) estudiaron el porcentaje de cielos despejados sobre Indonesia utilizando datos de satélites geoestacionarios tomados a lo largo de 15 años, usando la metodología propuesta por Erasmus & Sarazin (2002). Dicha metodología se basa en medir la temperatura de la atmósfera a diferentes alturas, para derivar la cantidad de vapor de agua precipitable y la humedad en la parte superior de la tropósfera. Con esto llegan a la conclusión que en una región tropical como ésta (i.e. Indonesia) es más común encontrar nubes en las montañas que en las costas.

Estudios como el de Cavazzani et al. (2011) se han enfocado en evaluar sitios astronómicos reconocidos por sus cielos despejados. En su trabajo los autores estiman el porcentaje de noches despejadas en Cerro Paranal, La Silla y La Palma, entre otros lugares con grandes observatorios. Sus resultados mostraron que dichos sitios alcanzan hasta un 88 % de noches despejadas al año (321 noches).

En el presente estudio se hizo una búsqueda de los sitios con mejores condiciones para la observación astronómica, en términos del número de noches despejadas en el año, en una región de América del Sur que cubre Colombia y parte de Venezuela y Ecuador. Para ello se utilizaron imágenes de satélite tomadas durante todo el año 2018, año en el que el satélite GOES-16 comenzó a ser operacional. El método usado para este trabajo se basa en el uso de una máscara de nubes creada a partir de observaciones de la atmósfera en 9 longitudes de onda diferentes producidas por dicho satélite, llamada ABI Cloud Mask. Este es un producto de nivel 2 (i.e. nivel para uso científico) del proyecto GOES-R series (NOAA-NASA, 2018; Heidinger, 2011), a partir del cual se estima el porcentaje de cielo nublado sobre la región y posteriormente la cantidad de noches con condiciones de nubosidad óptimas para la observación astronómica.

Este texto está organizado de la siguiente forma. En el capítulo 2, se enuncian conceptos importantes sobre el estudio de la atmósfera y el clima para la búsqueda de sitios astronómicos, así como el estado del arte en esta rama. En el capítulo 3 se hace una descripción de los datos analizados. El capítulo 4 explica la metodología utilizada para la estimación del porcentaje de cielos despejados, así como la validación de la misma. En el capítulo 5 se muestran los resultados finales con los sitios seleccionados y una interpretación de los mismos. Finalmente se muestran las conclusiones del trabajo en el capítulo 6.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. El Papel de la Atmósfera

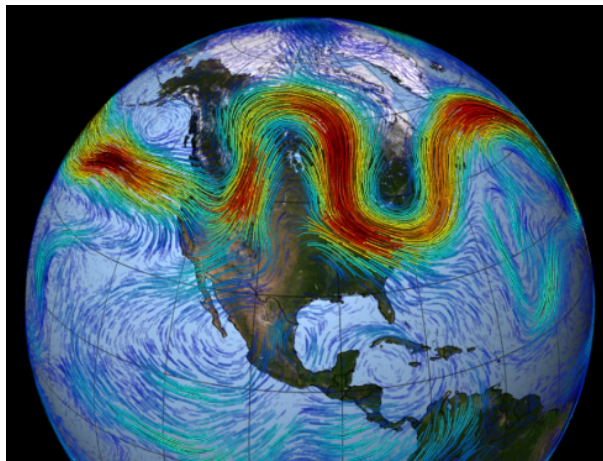


Figura 2.1: Corriente de chorro polar sobre norte América.¹

La atmósfera terrestre es una mezcla dinámica de gases que envuelve al planeta en una estructura de capas. Está compuesta principalmente por nitrógeno ($\sim 78\%$), oxígeno ($\sim 21\%$), argón ($\sim 0.9\%$) y dióxido de carbono ($\sim 0.04\%$). Que nuestra atmósfera tenga esta composición particular puede influenciar en parámetros físicos como la temperatura, la humedad, etc. La capa más cercana a la superficie de la Tierra es la troposfera, la cual se alza hasta los 10000 m.s.n.m². Ésta constituye aproximadamente el 90 % del contenido total de gases y el 99 % del vapor de agua de la atmósfera, el cual disminuye rápidamente con la altura, al igual que la temperatura (Andrews, 2010). Además, la turbulencia atmosférica, la cual afecta en gran medida las observaciones astronómicas, se produce en ésta capa (Lombardi et al., 2014) siendo consecuencia de los diferentes fenómenos enunciados a continuación. El más significativo sucede en los primeros 200 m, donde se genera convección del aire debido a la radiación térmica producida por el suelo y/o por estructuras sobre la superficie, como edificios, entre otros. Por otro lado, la topografía de un lugar produce turbulencia a media altura (entre 200 m y 2000 m sobre la superficie del sitio), siendo ésta menor para topografías regulares, i.e. en largas planicies o grandes masas de agua. Otro fenómeno que genera turbulencia, pero en menor medida, son los “jet streams”, o corrientes en chorro, que se producen en la alta

¹<http://svs.gsfc.nasa.gov/3864>

²Metros Sobre el Nivel del Mar

troposfera a causa de la rotación de la tierra y la radiación solar sobre la atmósfera (Meech, 2015), como el que se muestra en la figura 2.1, que es uno de los jets principales del planeta.

Debido a que pequeñas variaciones en la atmósfera (variaciones dinámicas o en su composición química) pueden generar cambios en el índice de refracción del aire (siendo éste supuestamente como un fluido) (Reiger, 1963; Dravins et al., 1997; Tokovinin et al., 2003; Cherubini et al., 2008; Cavazzani et al., 2012), la cantidad de luz que la atraviesa puede verse afectada. Este fenómeno produce que: (a) la cantidad de luz sea menor a la emitida por los objetos celestes y (b) no sea posible distinguir angularmente dos objetos cercanos en el cielo (i.e. menor resolución angular observada).

El estudio de la calidad del cielo y su relación con las condiciones meteorológicas se ha realizado tanto de manera teórica como de manera experimental. Por ejemplo, Cherubini et al. (2008) encontraron una forma de modelar las fluctuaciones en el índice de refracción, integrando un algoritmo de turbulencia óptica a simulaciones de turbulencia atmosférica con el modelo climático de quinta generación desarrollado por la Universidad de Pennsylvania MM5 (Mesoscale Model 5). Al comparar los resultados del modelo con observaciones realizadas en Mauna Kea, Hawaii por los instrumentos Generalized Scintillation Detection and Ranging (G-SCIDAR) y Multi-Aperture Scintillation Sensor (MASS), encontraron una buena aproximación al promedio diario de turbulencia óptica, particularmente para alturas atmosféricas menores a 4 km. Sin embargo, los datos observacionales muestran una gran variabilidad que el modelo no logra predecir.

Otro factor atmosférico de vital importancia para la observación astronómica, principalmente en el visible, es la formación de nubes, ya que estas bloquean la luz que proviene de los objetos celestes. Existen diferentes fenómenos que pueden dar lugar a la formación de nubes, algunos de gran escala relacionados con una dinámica global de la atmósfera, y otros de menor escala que dependen del microclima de cada región. Más adelante en este capítulo se hablará en detalle de algunos de ellos.

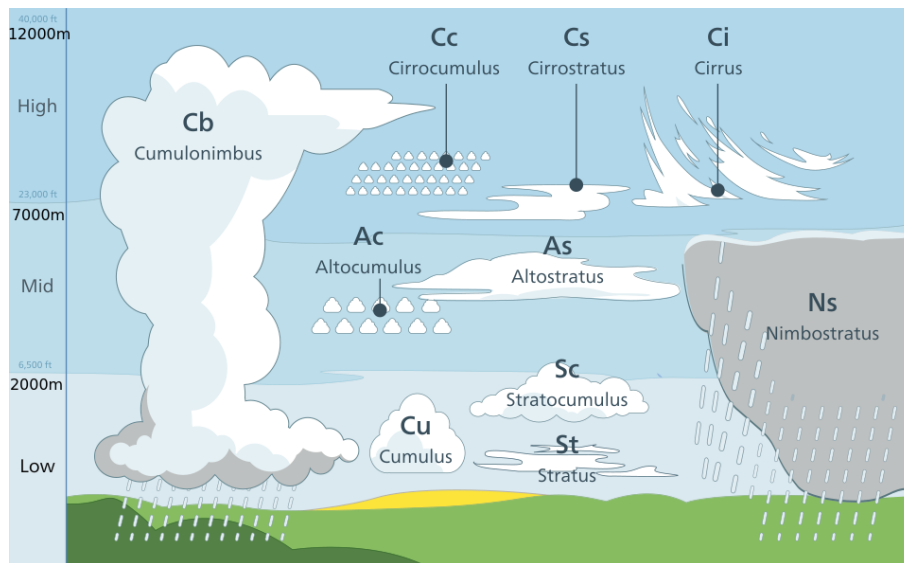


Figura 2.2: Clasificación de nubes³

Existen diferentes tipos de nubes, los cuales dependen de la altura a la que éstas se forman (ver figura 2.2). A grandes alturas (mayores a 7000 m.s.n.m.) se forman finas y blancas nubes de pequeños cristales de hielo, llamados Cirros, con formas filamentosas, también llamados Cirrocúmulos,

³https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/Cloud_types_en.svg

formados de pequeños granos o cúmulos, o Cirroestratos, con una forma de velo o manto (World Meteorological Organization, 2017).

A mediana altura (entre 2000 y 7000 m.s.n.m.) se pueden formar Altocúmulos y Altoestratos. Los Altocúmulos son nubes con formas redondeadas que pueden ser grises o blancas, dispuestas también en forma de cúmulos o granos como los Cirrocúmulos, pero generalmente más grandes que éstos. Un Altoestrato es una capa de nube grisásea o azulada y continua que puede cubrir todo el cielo o una parte de él; además es opaca, dejando pasar una escasa cantidad de luz del sol o cualquier otro objeto celeste (World Meteorological Organization, 2017).

A baja altura (menos de 2 km) se pueden formar Cúmulos, Estratocúmulos o Estratos. Los Estratocúmulos son capas de nubes que forman patrones de múltiples masas redondeadas o rollos grises o blancuzcos. Los Cúmulos son nubes aisladas, densas y bien definidas; su parte inferior es horizontal, mientras la parte superior suele tener forma de coliflor. El Estrato es una capa de nube gris con una base uniforme que puede producir llovizna o nieve (World Meteorological Organization, 2017).

Finalmente están las nubes de gran desarrollo vertical, como un Nimboestrato. Los Nimboestratos son una capa de nubes oscura y gruesa que se hace difusa por una lluvia continua, bloqueando la luz que la atraviesa. Otra clase de nube de este tipo son los Cumulonimbos, con una mayor extensión vertical que alcanza hasta los 12 km, es oscura en su base, puede generar precipitación, y es en ellas donde se generan las tormentas eléctricas (World Meteorological Organization, 2017).

2.2. El Clima en la Región

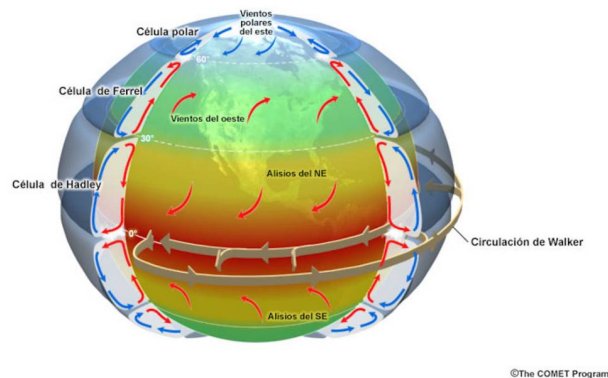


Figura 2.3: Circulación general de la atmósfera en la Tierra⁴.

La presencia de nubes es tal vez el fenómeno que más afecta a la astronomía observacional en las regiones ecuatoriales durante la noche, ya que en éstas se encuentran los vientos alisios provenientes del hemisferio norte con los del hemisferio sur. Estos vientos son producto de la combinación de la circulación generada, en principio, por la diferencia en la radiación solar recibida sobre la tierra (la cual es mayor en el ecuador que en los polos a través del año) y el efecto Coriolis generado por la rotación terrestre, desviando los vientos y haciéndolos fluir hacia el oeste (ver figura 2.3). Cuando estos vientos se encuentran cerca del ecuador, en la zona de convergencia intertropical (abreviado ZCIT) forman grandes masas de nubes como se muestra en la figura 2.4.

Sin embargo, el clima en los países ecuatoriales de América del Sur (como Colombia, Ecuador y Venezuela) está condicionado no solo por la ZCIT, sino también (en gran medida) por la geografía de

⁴Créditos: The Comet Program <http://www.comet.ucar.edu/>

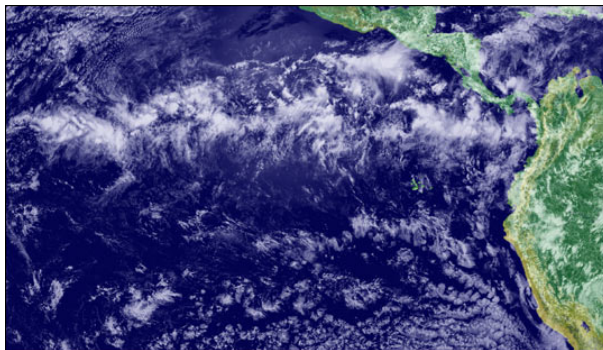


Figura 2.4: Imagen generada por una combinación entre datos de GOES-11 en diferentes bandas y datos de la superficie terrestre en color. Se muestra la Zona de convergencia intertropical⁵.

cada región. Una forma de clasificar el clima de cada región es por medio de variables atmosféricas, como precipitación y humedad relativa, cuyas variaciones son producto tanto de los fenómenos de circulación de la atmósfera como de las características particulares del lugar. Con base en ésto, y según las observaciones del IDEAM (ver apéndice A), se puede decir que Colombia tiene un clima en general húmedo, con excepciones por ejemplo en el Caribe y algunas regiones sobre la cordillera de los Andes, donde la humedad relativa anual es menor al 80 %. También está el caso contrario, con regiones muy húmedas como la Amazonía y el Pacífico, con humedades relativas mayores al 85 %. Si se analiza la precipitación anual se encuentran condiciones muy similares, con regiones secas en los Andes y el Caribe, siendo la Guajira la más destacada, y regiones más lluviosas en el Pacífico que en el resto del país (IDEAM, 2014).

Por otro lado, dado que Colombia se ubica en la región tropical del planeta, no se experimenta un clima estacional como en las altas latitudes. Sin embargo, a pesar de no tener estaciones, se habla de temporadas secas y húmedas, que están relacionadas con el movimiento de la ZCIT, que sigue el movimiento latitudinal aparente del Sol sobre la Tierra a lo largo del año, con un retraso de unos 2 meses (Pabón et al., 2001). Este movimiento se debe a la inclinación del eje de rotación de la tierra respecto a su eje orbital. En general, la distribución anual de la lluvia es similar en toda la región. Hay dos temporadas secas, una entre diciembre y febrero, y otra entre junio y agosto, y dos temporadas húmedas, la primera entre marzo y mayo, y la otra entre septiembre y noviembre (Mesa et al., 1997; Pabón et al., 2001). Además, “La temporada seca en el norte de la región ocurre durante los meses de invierno del hemisferio norte. La influencia de los alisios y el cambio en la posición de la zona intertropical de convergencia es determinante para esto” (Mesa et al., 1997, p.92). Sin embargo, estas temporadas presentan variaciones significativas en algunas regiones del país. Chaparro Molano et al. (2017) estudiaron diferentes variables atmosféricas a partir de datos tomados a lo largo de 30 años por estaciones meteorológicas de IDEAM distribuidas en gran parte de la región. En su trabajo, encontraron que, aunque gran parte del país experimenta dicha estacionalidad de las lluvias, algunas regiones particulares (como en el Caribe y el Pacífico) no presentan esta misma distribución, resultados que también pueden verse en IDEAM (2014).

2.3. Condiciones para la observación astronómica

Luego de estudiar el comportamiento del clima en una región, surge la pregunta de qué condiciones debe cumplir un lugar para ser un sitio adecuado para la astronomía observacional en el

⁵<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=703>

óptico. Dichas condiciones, algunas ya han sido mencionadas anteriormente, son la disponibilidad del mayor número de noches posibles sin presencia de nubes que puedan impedir la observación del cielo, un valor bajo de humedad que permita el correcto funcionamiento de los equipos ópticos, un seeing atmosférico bajo, lo que implica una baja turbulencia atmosférica sobre el sitio, etc. Todo esto nos lleva a buscar lugares generalmente altos, ya que la columna de aire sobre éstos es menor, por lo que la cantidad de vapor de en ésta también es menor (Andrews, 2010; Pabón et al., 2001; Chaparro Molano et al., 2017), con topografías regulares que no produzcan altos niveles de turbulencia y que de alguna forma inhiban la formación de nubes sobre ellos. Esta última puede tener lugar dadas las condiciones orográficas del sitio. Por ejemplo, el origen del desierto de Atacama en Chile se debe en parte al efecto sombra de lluvia (o sombra orográfica) producido por la cordillera de los Andes (Marquet et al., 1998). Este efecto consiste en que los vientos que vienen del este, al chocar con la cordillera descargan la humedad en forma de lluvias en esta parte de las montañas y el viento que baja al otro lado se encuentra relativamente seco.

En Colombia no se encuentra este efecto con semejante magnitud como el observado en Chile. Sin embargo, elevaciones de tierra de gran extensión y altitud pueden servir como barreras orográficas que produzcan efectos similares en sus alrededores. Así bien, para encontrar sitios que cumplan con esta condición, hace falta hacer un estudio de clasificación de noches despejadas sobre toda la región, particularmente donde puedan darse efectos como los mencionados.

2.4. Clasificación de cielos despejados

La cantidad de noches despejadas es un factor importante para la evaluación de sitios adecuados para la observación astronómica en el óptico. Con el objetivo de estimar el número de noches por año que pueden ser útiles para la astronomía observacional en diferentes regiones del país, Pinzón et al. (2015) implementaron una metodología basada en el estudio imágenes del satélite GOES-13 en dos bandas del infrarrojo, B3 (6.7 μm) y B4 (10.7 μm). Este método consiste en comparar la temperatura medida por el satélite (T_B) con una temperatura umbral (T_0). Esta última se puede hallar a partir de la altura del sitio, ya que los autores, usando datos históricos de temperatura del IDEAM (los cuales cubrían un 25 % del país), encontraron que la temperatura superficial en Colombia tiene un comportamiento lineal con la altura sobre el nivel del mar. Luego, si las medidas de T_B son mayores a la T_0 correspondiente, el brillo recibido por el satélite proviene del suelo, lo que indica que el cielo esta despejado. Si por el contrario, la temperatura es inferior al umbral, el satélite habrá detectado una nube. Este procedimiento se realizó en tres momentos diferentes que pretendían cubrir la mayor parte de la noche y determinar si fue una noche despejada o cubierta por nubes.

Existen otros métodos para definir la temperatura umbral. Por ejemplo, Cavazzani et al. (2011, 2012) realizaron un estudio similar en los sitios Cerro Paranal, la Silla y Tolonchar en Chile, en Mt. Graham, Estados Unidos, y en La Palma en las Islas Canarias, España. Vistos por el GOES-12, estos sitios no cuentan con la misma resolución espacial ya que se encuentran en posiciones diferentes relativas al satélite y ésta disminuye con en ángulo de visión del mismo. En dichos trabajos toman un umbral de temperatura basándose en la diferencia entre la temperatura de brillo en la banda B4 (T_B) respecto al máximo mensual de temperatura de brillo en la misma banda (T_B^{max}). Ambos son medidos en una matriz de $1^\circ \times 1^\circ$ (aproximadamente 111 km \times 111 km para la resolución horizontal de 4 km del GOES-12 en esta banda) centrada en la región de interés. Luego, definen una noche despejada como aquella que cumpla que $T_B^{max} - T_B \leq 2\sigma$; noche mezclada aquella que cumple que $2\sigma \leq T_B^{max} - T_B \leq 3\sigma$ y noche nublada si se cumple $T_B^{max} - T_B > 3\sigma$. Además, introducen el concepto de noche estable, definida a partir de la temperatura de brillo en una línea de tendencia

mensual ($T_B^{trendline}$) como aquella que cumple $|T_B - T_B^{trendline}| \leq |1\sigma|$. Finalmente, encontraron un número de noches despejadas vistas desde satélite equivalente al 88 % del tiempo en Paranal, 76 % en La Silla, 72.5 % en La Palma, 59 % en Mt. Graham y 86.5 % en Tolonchar.

La clasificación de cielos despejados en el presente trabajo se hace utilizando dos metodologías diferentes. La primera hace uso de imágenes tomadas por el satélite GOES-13 en las bandas B3, B4 y B6 (13.3 μm). La segunda metodología se propone debido a que el satélite GOES-13 fue remplazado por el GOES-16 en diciembre de 2017. Este nuevo satélite cuenta con una mejor resolución, tanto temporal, con datos del disco completo de la tierra (en el hemisferio visto por el satélite) cada 15 minutos, como espacial, con una resolución horizontal de 2 km por píxel. Esto permite hacer un estudio de cubrimiento de nubes con mayor detalle que lo que ofrecían los anteriores satélites. Además, el instrumento Advanced Baseline Imager (ABI) instalado en GOES-16 cuenta con un conjunto más amplio de bandas de observación (ver tabla en el siguiente capítulo), con el que es posible generar imágenes como las del ABI Cloud Mask (ACM), lo que será descrito en profundidad en capítulos posteriores.

Capítulo 3

Descripción de los datos

Una de las principales diferencias entre el ser humano y los demás seres vivos, y la que le ha permitido a las sociedades de nuestra especie evolucionar de una forma notablemente diferente, es la capacidad de heredar información. La transmisión del conocimiento es una parte crucial para el avance de una sociedad.

Hoy en día contamos con un medio versátil para compartir el conocimiento: internet. Gracias a ésta es posible acceder a gran cantidad de información tomada, almacenada y (en el mejor de los casos) publicada por entidades que trabajan en diferentes campos de la ciencia. Este carácter público de la información científica permite a investigadores de cualquier parte del mundo contribuir al desarrollo del conocimiento y por ende de la humanidad.

En particular en este trabajo se utilizaron datos proporcionados por entidades dedicadas al estudio en ciencias de la atmósfera, ya sea desde tierra o desde el satélites, tales como Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA)¹ y National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)², además de la información recolectada con medidas directas hechas desde diferentes sitios de Colombia. Este capítulo está dedicado a describir los diferentes datos utilizados, desde la forma en la que se obtuvieron, hasta la información que estos contienen.

3.1. Datos satelitales

Tabla 3.1: Resumen de la descripción de los datos satelitales utilizados en el presente trabajo

	GOES-13	GOES-16
Bandas utilizadas	B3, B4 y B6	ACM (ver texto)
Formato de imagen	Area	Net CDF
Resolución Espacial	4 km	2 km
Resolución temporal	60 min	15 min
Inicio del análisis	2017-09-10	2018-01-01
Final del análisis	2017-12-31	2018-12-31
Región analizada	Solo OATA	Colombia, parte de Venezuela y Ecuador

Para el presente trabajo, se utilizaron datos de Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES)³, un sistema de satélites geoestacionarios que provee información sobre las condiciones atmosféricas y de actividad solar en el hemisferio occidental del planeta, operado por NOAA. Actualmente el programa GOES cuenta con dos satélites operacionales, GOES-East y GOES-West,

¹<https://siata.gov.co>

²<https://www.noaa.gov/>

³<https://www.goes-r.gov/>

Tabla 3.2: Parámetros para transformación de cuentas GVAR a valores de radianza en $\text{mW}/(\text{m}^2 \text{ sr cm}^{-1})$

Canal	m	b
3	38.8383	29.1287
4	5.2285	15.6854
6	5.5297	16.5892

ubicados en longitudes de 75.2°W y 135°W respectivamente, y latitud 0° (al ser una órbita geoes-tacionaria éstos orbitan sobre el ecuador, a la misma velocidad de rotación de la Tierra) a una altura aproximada de 36 mil kilómetros sobre la superficie terrestre (NOAA-NASA, 2018). Su gran altura no solo permite tomar imágenes de todo el disco terrestre, también los hace ser muy estables al no experimentar fricción con las capas de la atmósfera por debajo de la exosfera. En este estudio solo se utilizaron datos del satélite GOES-East, ya que éste se encuentra justo sobre Colombia.

La tabla 3.1 resume la información sobre los datos utilizados de ambos satélites. La descripción en detalle se hace a continuación

3.1.1. GOES-13

El satélite GOES-13 operó como GOES-East entre abril del 2010 y enero del 2018. Éste tomó imágenes en cuatro longitudes de onda diferentes, una en el visible (la banda B1 centrada en $0.65 \mu\text{m}$) y tres en infrarrojo (B3, B4 y B6). La resolución de las imágenes es de 1 km por píxel en el visible y 4 km por píxel en infrarrojo. Como nuestro interés principal es el estudio del cielo en la noche, solo se tomaron las bandas en el infrarrojo, cuyas longitudes de onda efectivas son $6.7 \mu\text{m}$ para la banda 3 (B3), $10.7 \mu\text{m}$ para la banda 4 (B4) y $13.3 \mu\text{m}$ para la banda 6 (B6). Cada una de estas bandas permite observar fenómenos diferentes en la atmósfera. En B3 se pueden detectar nubes altas (a más de 7000 m.s.n.m., como los cirros), en B4 nubes de mediana-baja altura (entre 2000 y 6000 m.s.n.m.) y en B6 pequeñas partículas como niebla o nubes altas semitransparentes (Cavazzani et al., 2012).

El formato en el que son guardadas las imágenes de este satélite es GVAR (siglas para GOES Variable Format), el cual escala la radianza (o brillo) recibida por el detector y la guarda en cuentas de 10-bits. Dicho formato puede ser regresado a su valor de radianza utilizando la ecuación:

$$R = (X - b)/m, \quad (3.1)$$

donde X es el valor de las cuentas GVAR y R es la radianza en unidades de $\text{mW}/(\text{m}^2 \text{ sr cm}^{-1})$. Los parámetros b y m están dados en la tabla 3.2. Luego, para encontrar la temperatura se considera que la fuente es un cuerpo negro y se utiliza la función de Planck inversa, que puede ser escrita en términos del número de onda como:

$$T_{eff} = \frac{c_2 n}{\ln(1 + c_1 n^3 / R)}, \quad (3.2)$$

donde T_{eff} es la temperatura efectiva del cuerpo negro que radía con una intensidad R , n es el número de onda cuyo valor dependerá de la banda en que se observe (ver tabla 3.3) y las constantes c_1 y c_2 están dadas por:

$$c_1 = 2hc^2; \quad c_2 = \frac{hc}{k}, \quad (3.3)$$

donde h es la constante de Planck, c es el valor de la velocidad de la luz en el vacío y k es la constante de Boltzmann.

Tabla 3.3: Parámetros para transformación de temperatura efectiva a temperatura de brillo para información del satélite GOES-13.

Canal	$n \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	a	b
3	1522.52	-3.625663	1.010018
4	937.23	-0.386043	1.001298
6	749.83	-0.134801	1.000482

Luego, el valor de temperatura efectiva debe ser convertido a temperatura de brillo, lo cual depende del receptor y de la banda. Para esto se utiliza la ecuación:

$$T = a + bT_{eff} \quad (3.4)$$

Los valores de a y b están dados en la tabla 3.3.

Este procedimiento puede encontrarse descrito para éste y para los demás satélites antes de GOES-16 en Weinreb & Han (2011).

3.1.2. GOES-16

El satélite GOES-16 fue lanzado en noviembre del 2016 y comenzó su operación como GOES-East el 18 de diciembre de 2017. Este satélite hace parte de la nueva misión GOES-R Series de NOAA, en conjunto con la organización National Aeronautics and Space Administration (NASA), en la cual se incluyen nuevos y más completos instrumentos en los satélites GOES. Éstos ahora cuentan con el instrumento Advanced Baseline Imager (ABI), el cual captura imágenes de la tierra en 16 regiones diferentes del espectro electromagnético, distribuidas entre el visible y el infrarrojo, en vez de las 5 bandas de los anteriores satélites (ver tabla 3.4). Este instrumento tiene una mejor resolución espacial de 2 km por pixel en las bandas del infrarrojo (longitudes de onda mayor a 2 μm), 1 km en algunas bandas del visible y el infrarrojo cercano, y 0.5 km en la banda de 0.64 μm , como se muestra en la tabla 3.4. Además, disponen de una serie de productos de pos-procesado que integran los datos de imágenes en diferentes bandas para estudiar fenómenos particulares. Un ejemplo de estos productos es la máscara de nubosidad (abreviado ACM, de sus siglas en inglés para ABI Clod Mask, como fue llamado inicialmente), la cual determina la presencia o ausencia de nubes según la información dada por las diferentes bandas del satélite, como se explicará más adelante (ver cap. 4).

En este trabajo se utilizó la ACM derivada del GOES-16, usando imágenes cada 15 minutos durante la noche, información que puede ser adquirida libremente de la página de NOAA/CLASS⁴. Estos datos se utilizaron para estimar la cantidad de cielos despejados en el año 2018. Además, como se verá más adelante, fueron validados utilizando información tomada desde tierra para un sitio de prueba.

Las imágenes de GOES-16 están en formato NetCDF (Network Common Data Form), desarrollado por University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) para almacenar datos en forma de arreglos matriciales. En el caso de las imágenes de GOES, éstas contienen dos vectores de coordenadas x e y , que corresponden a una proyección geoestacionaria según la posición del satélite, cada una con 5424 entradas. La información medida por el instrumento se encuentra en una matriz de 5424×5424 con el valor de cada píxel que corresponde a cada par de coordenadas (x, y) .

La lectura de las imágenes se realizó usando la librería netCDF4 de Python⁵. En este mismo lenguaje de programación se realizó la proyección inversa de las coordenadas para obtener los va-

⁴<https://www.av1.class.noaa.gov/>

⁵<https://unidata.github.io/netcdf4-python/netCDF4/index.html>

Tabla 3.4: Información resumida de las 16 bandas espectrales del instrumento ABI de GOES-R

No.de banda	Long. de onda central (μm)	Apodo	Tipo de banda	Resolución del píxel
1	0.47	Blue	Visible	1 km
2	0.64	Red	Visible	0.5 km
3	0.86	Vegetation/Veggie	Infrarrojo cercano	1 km
4	1.37	Cirrus	Infrarrojo cercano	2 km
5	1.61	Snow/Ice	Infrarrojo cercano	1 km
6	2.24	Cloud Phase	Infrarrojo cercano	2 km
7	3.9	Shortwave Window	IR (con componente reflejado de día)	2 km
8	6.2	Upper-level tropospheric water vapor	Infrarrojo	2 km
9	6.9	Mid-level tropospheric water vapor	Infrarrojo	2 km
10	7.3	Lower-level tropospheric water vapor	Infrarrojo	2 km
11	8.4	Cloud-Top Phase	Infrarrojo	2 km
12	9.6	Ozone	Infrarrojo	2 km
13	10.3	“Clean” IR Longwave Window	Infrarrojo	2 km
14	11.2	IR Longwave Window	Infrarrojo	2 km
15	12.3	“Dirty” Longwave Window	Infrarrojo	2 km
16	13.3	“CO2” longwave infrared	Infrarrojo	2 km

lores de longitud y latitud de cada píxel, utilizando la librería Pyproj⁶. La elaboración de mapas con la información del satélite fue posible gracias a la librería Basemap del kit de herramientas de Matplotlib⁷. En los anexos a este documento se encuentra la descripción de algunos programas desarrollados para el análisis de imágenes de GOES-16 (ver apéndice B).

3.2. Datos tomados en tierra

Diferentes variables atmosféricas pueden ser medidas desde la superficie de la tierra y proporcionarnos información sobre las condiciones meteorológicas de un sitio. Además, las condiciones de la atmósfera en la superficie tienen correlación con las condiciones a diferentes alturas, incluyendo por ejemplo la presencia o ausencia de nubes.

En este trabajo se utilizaron medidas de variables atmosféricas tomadas con estaciones meteorológicas e imágenes del cielo tomadas en el valle de San Nicolás (con coordenadas $6^{\circ}6'N$, $75^{\circ}23'W$ y altura 2100 m.s.n.m.) y en el desierto de la Tatacoa (con coordenadas $3^{\circ}14'N$, $75^{\circ}10'W$ y altura 400 m.s.n.m.). La información en Tatacoa fue proporcionados por el Observatorio Astronómico de la Tatacoa (OATA), mientras que la información sobre el valle de San Nicolás fue adquirida por nosotros, desde la Universidad de Antioquia, Seccional Oriente.

Para el desierto de la Tatacoa se contaba con información meteorológica de la estación del observatorio desde el 10 de septiembre hasta el 31 de diciembre de 2017, y desde el 1 de febrero hasta el 29 de mayo de 2018, así mismo para las imágenes de cielo. Estas últimas fueron tomadas con una cámara Ricoh Theta s, con un tiempo de exposición de 3 segundos, dos veces al día, una en

⁶<https://github.com/pyproj4/pyproj>

⁷<https://matplotlib.org/basemap/>

la tarde (entre las 17 y las 19 horas) y otra en la noche (entre las 20 y las 0 horas).

En el Valle de San Nicolás se instaló una estación meteorológica Davis Vantage Pro-2 para medir variables como precipitación, temperatura, presión, velocidad y dirección del viento. Se obtienen datos continuamente de ésta desde el 19 de febrero del 2019 hasta la fecha, con 1 medida cada minuto. Además, se instaló también una cámara con una lente ojo de pez o cámara all-sky, logrando obtener imágenes del cielo con una resolución temporal de hasta un minuto, permitiendo hacer un monitoreo continuo del cielo. Estos datos son de esencial importancia para realizar la validación de la información obtenida del satélite.

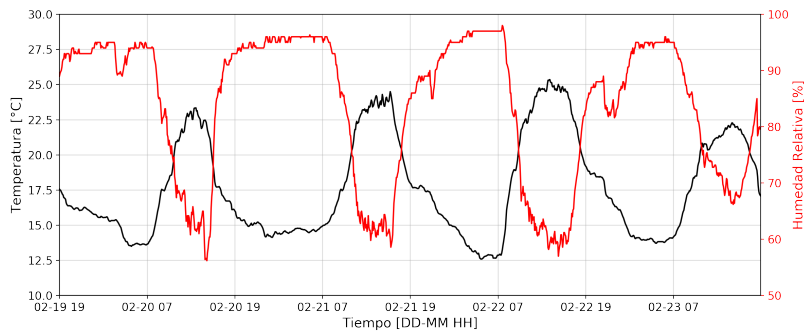


Figura 3.1: En negro se muestra la temperatura y en rojo la humedad relativa, ambas promediadas cada 5 minutos entre las noches del 19 y del 23 de febrero de 2019. Medidas tomadas por la estación en el Valle de San Nicolás.

En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de medidas de temperatura y humedad relativa tomadas por la estación meteorológica en San Nicolás durante 4 días de febrero de 2019. En ésta se puede ver el ciclo diario de estas dos variables, en el que se da un aumento de la temperatura mientras la humedad relativa disminuye durante el día, y lo contrario durante la noche. También se observa que la noche del 22 la temperatura en la noche fue mayor que en la del 20, mientras la humedad relativa fue menor, dado también a que el cambio en la pendiente de estas variables se comenzó a dar más tarde el 22 que el 20, debido a precipitación en la tarde de este último. Esta diferencia se ve con más detalle en las figuras 3.2 y 3.3. Además, la figura 3.4 muestra dos imágenes de cielo tomadas por la cámara instalada en el sitio a las 19 horas del 20 y del 22 de dicho mes, en las que se puede ver un cielo nublado en la primera imagen y despejado en la segunda. No obstante, las diferencias presentadas en estos dos días no se debe solo a la presencia de nubes a una hora específica, sino al comportamiento del clima en cada día, pues como ya se dijo antes, la temperatura disminuyó más temprano el día 20 debido a lluvias en la tarde de este día.

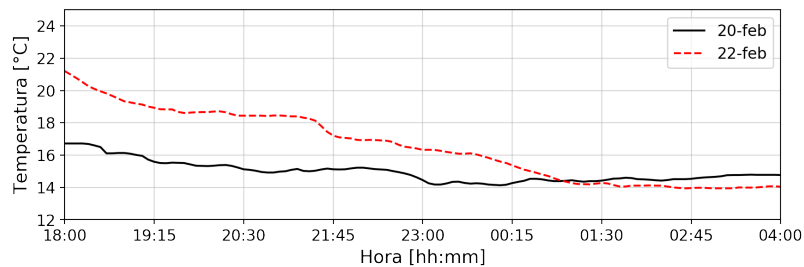


Figura 3.2: Medidas de temperatura tomadas por la estación meteorológica en el Valle de San Nicolás en las noches del 20 (en negro) y 22 (en rojo) de febrero de 2019.

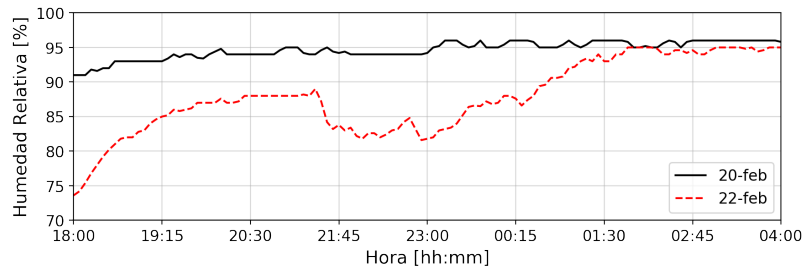


Figura 3.3: Medidas de humedad relativa tomadas por la estación meteorológica en el Valle de San Nicolás en las noches del 20 (en negro) y 22 (en rojo) de febrero de 2019.

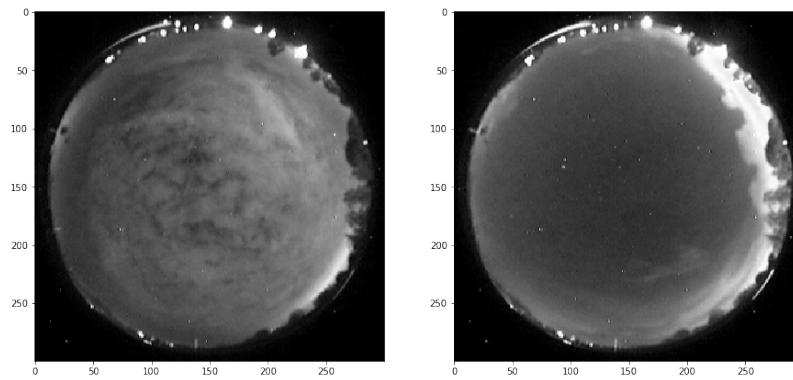


Figura 3.4: Fotografías de los días (a) 20 y (b) 22 de febrero de 2019, a las 19:00 UTC-5 (Hora legal de Colombia), tomadas por la cámara de cielo completo instalada en el Valle de San Nicolás.

Capítulo 4

Descripción y validación de la metodología

La cantidad de noches despejadas es un factor importante para la evaluación de sitios adecuados para la observación astronómica. Sin embargo, no basta con saber cuántas noches al año se pueden utilizar con este fin en un sitio en particular, hace falta determinar en qué épocas se pueden dar las mejores condiciones de observación, lo que, entre otras cosas, implica conocer cuántas noches despejadas consecutivas pueden haber. En este trabajo se hace uso de imágenes satelitales de GOES para estimar dicha cantidad. Como se verá a continuación, la metodología usada para la identificación de cielos despejados con imágenes de GOES-16 es diferente a la empleada en el caso de GOES-13, puesto que para el primero se utiliza el algoritmo ACM, el cual hace uso de una amplia gama de bandas del espectro electromagnético, con las cuales no contaba el satélite GOES-13. Dicho algoritmo será descrito en el presente capítulo, además de las estrategias empleadas para la identificación de nubes con cada satélite. Por otro lado, la identificación de nubes con GOES-13 como se hizo en este trabajo, requiere de mediciones hechas en tierra desde el sitio en cuestión, por lo que solamente se mostrarán los resultados usando este satélite para un sitio en particular, como se verá en la primera sección del presente capítulo.

4.1. Análisis con GOES-13

El estudio de cielos despejados en el año 2017 se realizó con imágenes del GOES-13 en las bandas B3, B4 y B6, tomadas cada día entre las 17:00 horas y las 05:00 del día siguiente, con una resolución temporal de una hora. Se analizó una región de 3×3 píxeles centrada aproximadamente en las coordenadas del sitio OATA, lo que corresponde a un área de $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ alrededor de dicho sitio. Se tomaron los datos sobre esta área y aplicando el procedimiento mostrado en el capítulo 3 se encontró la temperatura de brillo promedio en dicha área correspondiente a la banda B4. Dado que ésta corresponde a la temperatura de la atmósfera a mediana altura, se esperan valores por debajo de la temperatura en superficie, como se ve en la figura 4.1.

El método de detección de nubes en este caso consiste en encontrar un umbral para la temperatura de brillo, con el cual se pueda definir como instante de tiempo despejado aquel cuya temperatura de brillo sea mayor o igual a dicho umbral. Para ello, se clasificaron las imágenes de cielo tomadas en tierra y se seleccionaron aquellas que estuviesen completamente despejadas o nubladas y se compararon las temperaturas superficial y de brillo en el tiempo más cercano al momento en que se tomó la foto. Debido a la falta de fotos de cielo en los demás sitios, este estudio se realizó solo en el desierto de la Tatacoa, encontrando que en promedio la temperatura de brillo en la banda B4 está

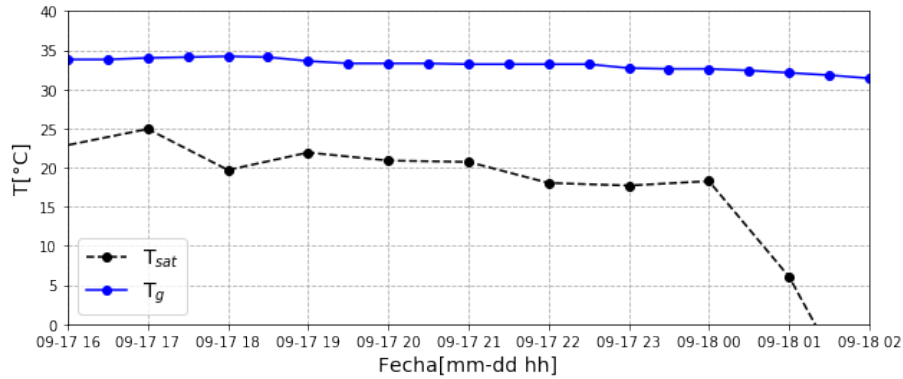


Figura 4.1: Temperatura medida en superficie (azul) comparada con la medida en satélite usando la banda B4 (negro) la noche del 17 de septiembre de 2017

$13.11 \pm 2.65^\circ$ por debajo de la temperatura medida en tierra durante una noche despejada, mientras que en presencia de nubes esta diferencia es más grande y presenta mayor variación, como se puede ver en la figura 4.2. Teniendo esto en cuenta, se definió la temperatura umbral para el sitio OATA como la temperatura medida en superficie menos la diferencia promedio entre ésta y la temperatura de brillo. Luego, para no depender de medidas en tierra constantemente, se puede definir este umbral tomando el valor promedio de la temperatura del lugar en la noche, en vez de tomarlo a cada instante. Las figuras 4.3 y 4.4 son ejemplos de noches despejada y nublada, respectivamente, que muestran como esta definición es consistente con lo que se observa desde tierra, tomando tanto el valor promedio como el valor instantáneo del umbral de temperatura.

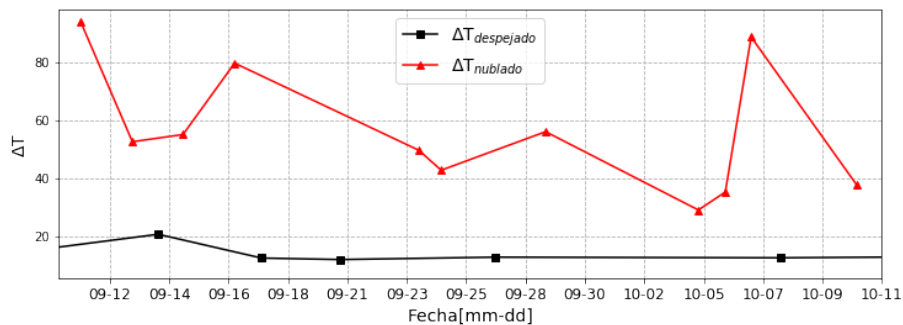


Figura 4.2: Diferencia entre la temperatura medida en la superficie y la temperatura de brillo en la banda B4 (medida desde satélite) para noches nubladas (en rojo) y noches despejadas (en negro) en el desierto de la Tatacoa, entre el 11 de septiembre y el 11 de octubre.

Luego de definir este umbral, se estudió el comportamiento de las bandas B3 y B6 en relación a la banda B4. Las figuras 4.5 y 4.6 muestran los gráficos de las temperaturas de brillo en B3 y B6 contra B4, para datos entre el 9 de septiembre de 2017 y el 31 de diciembre del mismo año. Allí se observa una clara correlación entre los valores de cada banda, con lo que se podría estimar una primera aproximación al umbral de temperatura de brillo en las bandas B3 y B6 para la detección de cielos despejados. Sin embargo, algunos fenómenos, como la presencia de cirros o de niebla, no pueden ser detectados en la banda B4, por lo que una clasificación como despejado en dicha banda no implica que también lo sea en las dos restantes (Erasmus & Sarazin, 2002; Hidayat et al., 2012).

Finalmente, haciendo uso de ésta metodología, se encontraron 111 ± 21 horas despejadas durante la noche (i.e. entre las 19 horas y las 5 horas) para el período comprometido entre los días 10 de

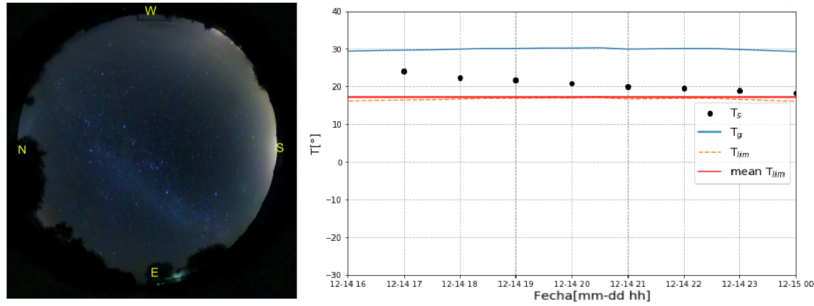


Figura 4.3: Resultados del método del umbral de temperatura para la noche del 14 de diciembre de 2017. A la izquierda se muestra la fotografía de cielo tomada desde el sitio OATA y a la derecha las temperaturas medidas por el satélite GOES. La curva azul representa la temperatura tomada en tierra, las línea a trazos muestra la temperatura umbral y la línea roja su promedio. Los círculos negros representan la temperatura de brillo medida en B4.

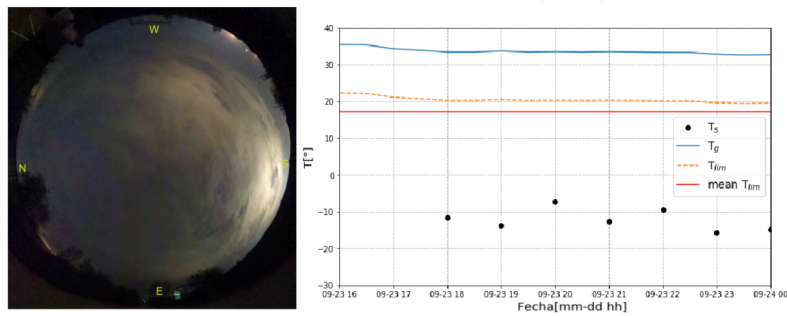


Figura 4.4: Igual que la figura 4.3 pero para la noche 23 de septiembre de 2017.

septiembre y 31 diciembre del 2017. Esta cantidad de horas corresponde a un $(9.91 \pm 1.8)\%$ del total de la muestra. Del total de noches analizadas, el 52% del tiempo despejado en este lugar se presentó en el mes de diciembre, con un total de 58 horas despejadas, siendo este el mejor de los meses analizados con este método. Sin embargo, no se encontró ninguna noche con más de 5 horas despejadas consecutivas. El máximo número de horas consecutivas alcanzado fue de 4, en los días 6, 7, 15, 19 y 22 de diciembre, y el 23 de noviembre. Los resultados fueron comparados con las imágenes tomadas en tierra, obteniendo una buena correlación. La figura 4.7 muestra, por ejemplo, las fotografías de las noches del 15 y el 22 de diciembre. Debido a que las imágenes no fueron tomadas regularmente y además sólo se tiene una por noche, no se tiene una buena medida de la precisión del método.

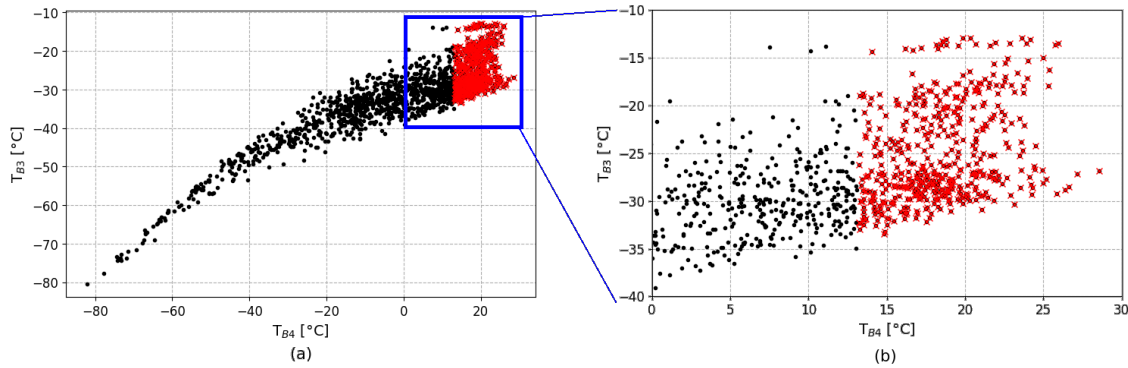


Figura 4.5: (a) Relación entre las temperaturas de brillo en la banda B4 y B3. (b) Acercamiento en la región dentro del recuadro azul. En rojo se muestran los datos que corresponden a un cielo despejado en B4. Datos entre septiembre y diciembre de 2017

Por otro lado, dado que este método requiere imágenes de cielo y datos meteorológicos tomados en el sitio en cuestión, no es muy práctico a la hora de buscar sitios potenciales para la observación astronómica en el país. De este modo y para la claridad del lector, el objetivo de esta sección es mostrar un resultado en un sitio particular utilizando una metodología similar a la utilizada en trabajos anteriores como el de Pinzón et al. (2015) en Colombia. Un estudio mucho más detallado y global (para todo el país), se realizó utilizando una metodología diferente como se verá en la siguiente sección.

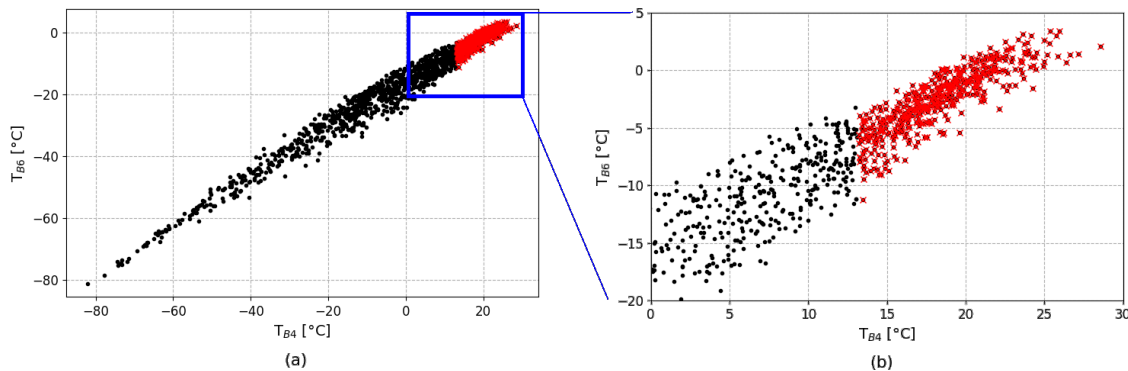


Figura 4.6: Igual que la figura 4.5 pero con B6 en lugar de B3.

4.2. Análisis con GOES-16

4.2.1. ABI Clod Mask

La máscara de nubes del ABI (o ACM) proporciona un conjunto de datos binarios a partir de un análisis de diferentes variables calculadas a través de observaciones en 9 de los 16 canales de la cámara ABI del satélite GOES. Las bandas usadas por el algoritmo son la número 2, 4, 5, 7, 9 (si no está la 10), 10, 11, 14 y 15, cuyas longitudes de onda efectivas pueden verse en la tabla 3.4. Además, el algoritmo utiliza información que no es medida por el satélite, como Modelos de Transferencia Radiativa (RTM, por sus siglas en inglés), máscaras de terreno, entre otras cosas que se debe tener en cuenta para determinar si un píxel está nublado, asignándole un 1, o despejado, que correspondería a un 0. Adicionalmente, el algoritmo es capaz de crear una máscara de nivel

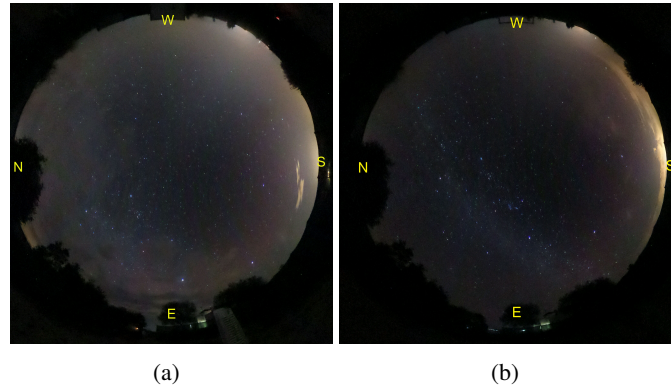


Figura 4.7: Imágenes de cielo completo tomadas desde el OATA el (a) 15 y el (b) 22 de diciembre de 2017, a las 21 y las 22 hora local (GMT-5), respectivamente.

4, es decir con 4 posibles valores para cada píxel, añadiendo las categorías probablemente nublado y probablemente despejado. A continuación se hace una breve descripción del algoritmo utilizado para crear la ACM. La información presentada a continuación está basada en el trabajo de Heidinger (2011). Referimos a los lectores que deseen mayor detalle sobre los procedimientos llevados a cabo a dicho trabajo.

Datos de entrada

La máscara ACM recibe tanto datos del ABI de GOES como de otras fuentes, por ejemplo de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)¹, de National Centers for Environmental Prediction (NCEP)², entre otras. Entre los datos medidos propiamente por el satélite están el porcentaje de reflectancia solar (medidas en los canales 2, 4, 5 y 7), radianzas, temperaturas de brillo y emisividad, medidas en las diferentes bandas. También usa datos de geolocalización en cada píxel, como el ángulo cenital y azimutal del satélite y del sol.

Como información auxiliar, es decir información conseguida de otras fuentes, usa diferentes máscaras de terreno derivadas de MODIS para identificar costas, agua, desiertos, etc. sobre las imágenes. También hace uso de RTMs y de modelos numéricos de predicción meteorológica, derivados de NCEP, para generar las condiciones esperadas durante un cielo despejado.

Proceso de clasificación de píxeles

El método de identificación de nubes o de píxeles despejados es análogo al descrito anteriormente para los datos del satélite GOES-13. Éste se basa en analizar el comportamiento de las diferentes variables de entrada en cada uno de las bandas observadas y definir un umbral que separe los cielos despejados de los nublados. El cálculo de los valores de cada umbral están basados en las observaciones del Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite (CALIPSO), un proyecto de NASA para el estudio del papel de las nubes y aerosoles en la regulación del clima de la Tierra³, el cual a su vez utiliza RTMs para calcular dichos umbrales.

En este proceso de clasificación se someten las imágenes a diferentes pruebas que dependen del tipo de detección asociado a la clase de nube que pueda estar presente y que puede ser detectada en

¹<https://modis.gsfc.nasa.gov/>

²<https://www.ncep.noaa.gov/>

³https://www.nasa.gov/mission_pages/calipso/main/index.html

una u otra banda del ABI. Dichas pruebas incluyen:

- **Pruebas de detección de nubes en infrarrojo.** Esta primera parte se basa en el hecho que las temperaturas de brillo de las bandas en el infrarrojo es más baja cuando hay nubes. Así, el algoritmo compara las observaciones en las bandas del infrarrojo 10, 11, 14 y 15, con los resultados dados por CALIPSO para cielos despejados y nublados, y los umbrales derivados de éstos.
- **Pruebas de detección en longitudes de onda corta del infrarrojo.** En este caso se utiliza el canal 7 para hacer la clasificación de los píxeles, dado que las observaciones en $4 \mu\text{m}$ tienen una alta sensibilidad a la presencia de nubes. Del mismo modo, se comparan las observaciones con los modelos RTM y los resultados de CALIPSO.
- **Pruebas de reflectancia solar.** Éstas se hacen en la banda 2 del visible ($0.64 \mu\text{m}$), considerando que la cantidad de luz reflejada por las nubes es mayor que la reflejada por el suelo. Para esta banda se toma una muestra que iguala la resolución de 2 km de las bandas en infrarrojo. También se aplican pruebas en las bandas 4 y 5 del infrarrojo cercano. La banda 5 se usa para identificar nubes en lugares cubiertos por nieve o hielo, ya que la reflectancia en $1.6 \mu\text{m}$ es muy baja para la nieve, pero sigue siendo alta para las nubes. La banda 4 se usa para detectar cirros finos, pero el algoritmo que estima la máscara ACM solo aplica el test en esta banda sobre píxeles con ángulo cenital solar menor que 80° , con una altura máxima de 2000 m y que no tienen nieve, haciendo uso de las diferentes máscaras de terreno.
- **Pruebas de uniformidad.** Finalmente el algoritmo analiza las regiones con alta heterogeneidad para clasificar píxeles como probablemente nublados o despejados, basándose en el comportamiento de los píxeles que hay alrededor. Ésta prueba tiene dos partes, una basada en la reflectancia observada en la banda 2, estudiando la desviación estándar en cajas de 3×3 alrededor de cada píxel. La segunda realiza el mismo estudio pero para la temperatura de brillo medida en la banda 14.
- **Pruebas de restauración.** Éstas consisten en observar cada píxel de la imagen, si un píxel despejado o parcialmente despejado está dentro de una caja de 3×3 centrada en un píxel nublado, éste último se cambia a probablemente nublado. De forma similar, a un píxel que era probablemente despejado se puede reclasificar como despejado.

Las últimas dos pruebas no serán de interés en este trabajo, ya que no se trabajará con imágenes a nivel 4, sino únicamente con la información binaria (nublado o despejado). Además, como se verá a continuación no se trabajará con píxeles individuales, por lo que la matriz binaria es suficiente para este estudio.

Resultados y precisión de la ACM

Finalmente, en Heidinger (2011) se presenta la comparación de los resultados de ACM con los de otros proyectos que realizan identificación de nubes, como CALIPSO y MODIS Cloud Mask, para un conjunto de datos seleccionados. Los resultados presentados muestran un acierto cercano al 89 % en la probabilidad tener una detección correcta, comparada con CALIPSO y del 91 % comparado con MODIS.

4.2.2. Metodología para evaluación de sitios

Gracias a la gran resolución del instrumento ABI (2 km por pixel) se pueden hacer un estudio más preciso de los posibles sitio de interés geográfico para realizar observaciones astronómicas, particularmente para los casos de lugares con topografía accidentada. Sin embargo, las nubes que vemos desde tierra pueden estar a más de 2 km del sitio o tener extensiones mayores a esta medida, lo que puede influir en los resultados. Para disminuir el error introducido por este factor, se uso una cuadrícula de 3x3 pixel (i.e. 6 km×6 km) centrada en el más cercano a las coordenadas. De esta manera se reduce la incertidumbre en las fluctuaciones medidas por cada pixel, sin afectar el área de cobertura (la cual siempre está centrada en las coordenadas del sitio de estudio). De esta forma es posible obtener un intervalo de confianza en los resultados de cada sitio a partir del error estándar calculado dentro de cada área.

La metodología empleada para clasificar las observaciones del satélite cómo un cielo despejado o nublado consiste en observar el promedio del valor de los píxeles en el área a estudiar, al que llamaremos *fracción de cielo nublado* (abreviado como FCN). Dicho promedio representa el porcentaje o la fracción del área que se encuentra nublado, es decir, si esta cantidad tiene un valor de 1 significa que todos los píxeles en el área están nublados, mientras que si es 0 significa que todos los píxeles están despejados. A partir de estos valores se introduce una cantidad a la que llamaremos *fracción de cielo despejado* o simplemente CSF (abreviado del inglés *clear sky fraction*), la cual esta relacionada con la FCN a través de la ecuación: $CSF = 1 - FCN$, Esta fracción representa el porcentaje o la fracción de píxeles en el área a estudiar que se encuentran despejados. Por ejemplo, si la mitad de los píxeles están despejados, la CSF será igual a 0.5, mientras que si todos los píxeles están nublados ésta será igual a 0.

Para nuestro caso particular, la cámara de cielo se encuentra ubicada en el Valle de San Nicolás. Para garantizar que la región observada por el satélite fuera la misma analizada por las imágenes de la cámara de cielo se debe tener en cuenta la altura de la(s) nube(s) que se observan en las imágenes tomadas desde tierra. De esta forma se puede estimar la distancia a la que están dichos objetos de la cámara, usando la relación $r = h \tan \theta$, que se deduce de la figura 4.8, siendo r la distancia horizontal a la que se encuentra la nube y h su altura. La altura a la cual están las nubes se puede estimar experimentalmente. Para ello se usaron medidas tomadas por el SIATA sobre el Valle de Aburrá, el cual se encuentra a una altura sobre el nivel del mar ~ 600 metros menor a la del Valle de San Nicolás (altura media derivada usando el software Google Earth Pro). La figura 4.9 muestra la cantidad de agua en la línea vertical medida con un ceilómetro⁴ ubicado en la ciudad de Medellín ($6^{\circ}15'33''$, $-75^{\circ}35'18''$), la cual se encuentra en el Valle de Aburrá. Se observa que las nubes más gruesas se forman a partir de los 2 km de altura, y alcanzan una altura de hasta ~ 4.6 km. A partir de estas medidas tomamos como altura límite los 4 km para la formación de nubes gruesas, y suponemos que será la misma para el Valle de San Nicolás. Así, una nube observada a un ángulo cenital de 45° estará como máximo a 4 km de la ubicación de la cámara. La figura 4.10 muestra un radio de 4 km al rededor del sitio, además de la cuadrícula de píxeles analizada en las imágenes satelitales. En este se puede ver que ambas regiones cubren un área similar. Es importante mencionar que el uso del ceilómetro sobre el Valle de Aburra mide la cantidad de agua líquida en un sitio específico, y dada la topografía de ambos sitios, las distancias estimadas son aproximadas.

Para evaluar la precisión del método se compararon los resultados de satélite con las imágenes tomadas en tierra, analizadas mediante un algoritmo desarrollado en el lenguaje de programación Python que identifica los valores de cada píxel en una escala de grises (valores entre 0 y 255) dentro la imagen a partir de un ángulo específico centrado en el cenit de la cámara. El algoritmo asigna la característica de nublado a aquellos píxeles con un valor por encima de un umbral dado

⁴Ver especificaciones en: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/CL51-Datasheet-B210861EN.pdf>

por las características de las imágenes. El valor encontrado para este umbral fue de 70. Además, la circunferencia límite no debe tener un radio mayor al correspondiente a 45° de ángulo cenital, ya que esto implicaría un diámetro de más de 8 km, siendo mayor a los 6 km del área observada por el satélite. El radio de la circunferencia en píxeles medido desde el centro de la imagen es calculado usando siguiente expresión:

$$r = f \sin(z), \quad (4.1)$$

donde f es la distancia del centro de la imagen (o cenit) hasta su horizonte.

La figura 4.11 muestra una de las imágenes de la cámara UdeA-oriente antes y después de aplicar el algoritmo. Se puede ver una buena detección de nubes sobre la imagen. No obstante, las luces de los alrededores afectan los resultados cerca al borde tanto de la imagen como del área analizada, por lo que la FCN medida sobre ésta será una sobre-estimación. Este problema no puede ser solucionado con facilidad ya que esto genera que algunos píxeles despejados tengan valores incluso más altos que otros que están nublados. Sin embargo, al comparar los resultados del algoritmo directamente con las imágenes se encontró que por debajo del 40 % de FCN se encuentran cielos despejados, en el caso del análisis desde tierra.

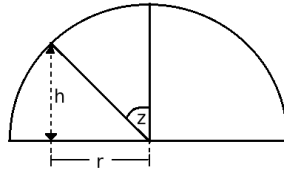


Figura 4.8: Distancia horizontal hasta la cámara desde un objeto a un ángulo cenital z y altura h dados.

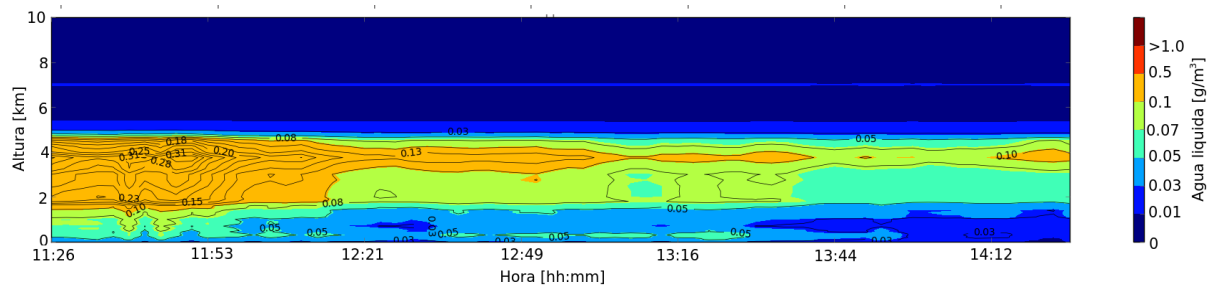


Figura 4.9: Gráfico de la cantidad de agua líquida en la vertical medida por un ceilómetro sobre el Valle de Aburrá durante 3 horas del 25 de abril de 2019⁵. El eje vertical representa la altura sobre el suelo del lugar. La mayor concentración de agua líquida se presenta entre los 2 km y los 5 km de altura, representada por el color naranja, como se puede observar en la barra lateral.

Para establecer la CSF medida por el satélite se realizó una comparación entre las observaciones en tierra y las imágenes de satélite. A partir de dicha comparación se encontró que los datos medidos por el satélite con un CSF mayor al 75 % corresponden, en la mayoría de los casos, a cielos despejados (observados desde tierra), por lo que se eligió éste como valor límite para la clasificación.

Con esta metodología se analizaron las imágenes satelitales y de cielo, tomando el CSF promedio en diferentes intervalos de tiempo. Para analizar el CSF promedio en la noche por cada día del mes, se tomaron dos rangos de tiempo, uno entre las 18 y la media noche, y el otro entre las 0 y

⁵Tomado de <https://siata.gov.co>

⁶Imagen generada en el software Google Earth pro.

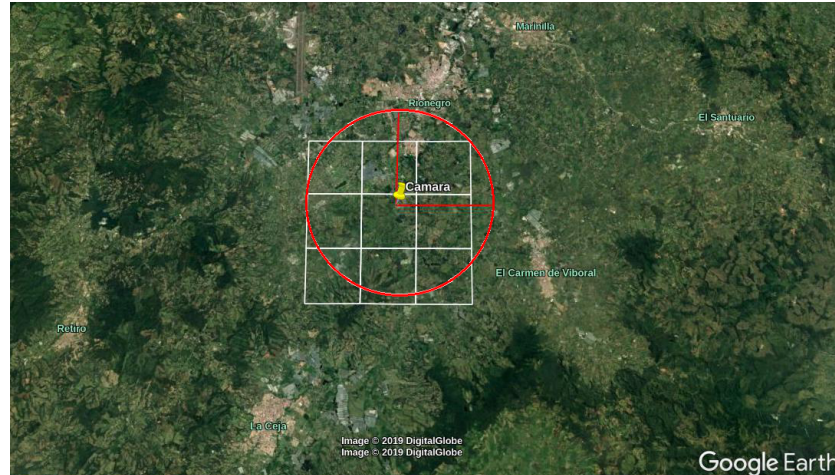


Figura 4.10: Imagen satelital del Valle de San Nicolás centrada en lugar de ubicación de la cámara de cielo (pin amarillo). En blanco el área del satélite analizada y en rojo el radio de visión de la cámara a 45° de ángulo cenital⁶.

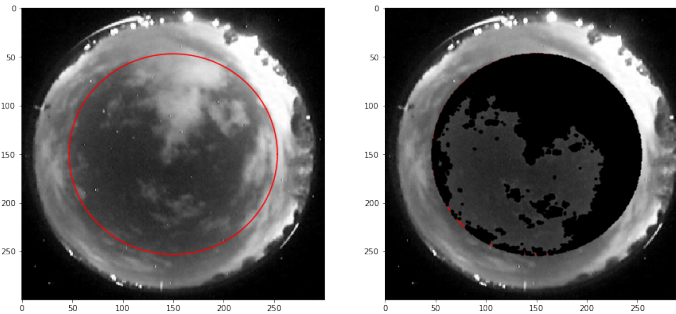


Figura 4.11: Ejemplo del resultados del algoritmo de detección implementado sobre las imágenes de cielo en el valle de San Nicolás. La circunferencia roja representa la región del cielo dentro de 45° de ángulo cenital

las 4 horas. Por ejemplo, La figura 4.12 muestra los resultados para el mes de octubre de 2018. Allí se puede ver que la información derivada del satélite y la tomada desde tierra presentan un comportamiento similar. En general se observa que las medidas desde el satélite son más altas que las medidas hechas en tierra. La diferencia observada en los valores se debe a fuentes de luz externas, en las que se incluyen tanto luces artificiales como la luz reflejada por la Luna (La cual no ve el satélite por estar en una órbita más cercana). Por ejemplo, la noche del 26 de octubre, que presenta un valor relativamente alto en la información de satélite, muestra un valor de CSF más bajo calculado in las imágenes de tierra debido a la presencia de la luna, como se muestra en la imagen de la figura 4.13, que a pesar de ser un cielo despejado, el algoritmo entrega más de un 54 % del área como nublado.

La figura 4.14 muestra los resultados con el mismo intervalo de tiempo para septiembre de 2018. El valor de CSF tomado en tierra solo se muestra desde el 13 de este mes, día en que se instaló la cámara en el sitio. Éstos son similares a los de octubre, exhibiendo un comportamiento semejante entre la información de satélite y de tierra. En este caso, los valores del análisis en tierra se encuentran notablemente por debajo de los datos de satélite (por ejemplo los días 20, 22 y 24) debido a que hubo condensación del aire al interior de la cúpula de la cámara, además de la presencia de la luna, haciendo que las gotas en el cristal bloquearan la vista del cielo y que el algoritmo lo

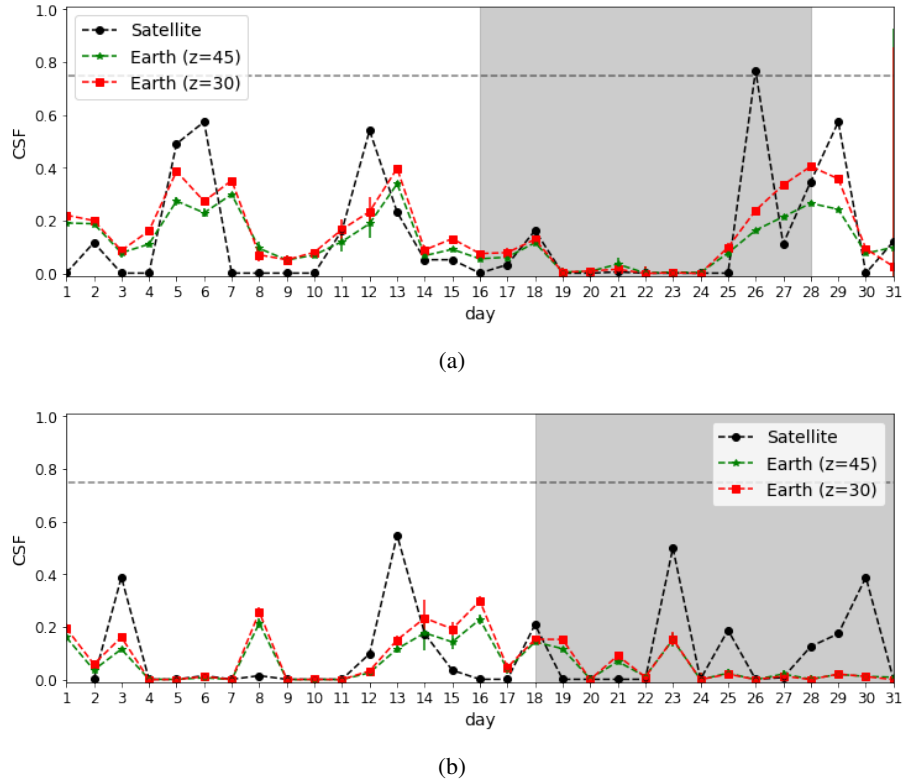


Figura 4.12: Porcentaje de cielo despejado entre (a) las 18:00 y la media noche, y (b) entre las 0 y las 4 horas de cada día del mes de octubre de 2018. En negro los valores obtenidos de satélite. En verde y rojo, los obtenidos en tierra y calculados con el algoritmo de identificación de nubes con diferente ángulo cenital z (ver leyenda). La línea horizontal gris marca un valor de CSF del 75 %. La zona sombreada representa los días en los que la luna estuvo sobre el horizonte en el intervalo analizado, con fase mayor al 50 %. Las barras de error están asociadas al número de datos que faltan respecto a la resolución utilizada.

detectara como nube, a pesar de tener un cielo despejado, tal como lo muestra la figura 4.15. Este problema se solucionó posteriormente, instalando una resistencia que mantuviese cálido el aire al interior de la cúpula, evitando la condensación.

La figura 4.16 muestra el CSF promedio por hora para el 22 de septiembre, que como se ve en la figura 4.14 alcanza valores relativamente altos de CSF. Es claro que, a pesar que los valores en los resultados del algoritmo difieren de los del satélite, el comportamiento de éstos sugiere una correlación entre lo que detecta la máscara ACM y lo que se ve desde tierra. Luego, para hacer una mejor comparación entre los resultados del satélite y los del algoritmo para imágenes en tierra, se tomaron los datos correspondientes a cielos sin Luna y despejados según la definición propuesta anteriormente ($CSF > 0.75$), pues para los valores más bajos (por debajo del 40 %) hay una mejor correlación. Se encontraron 62 imágenes de satélite que cumplieran con la condición de despejado, tomadas entre septiembre y diciembre de 2018. La figura 4.17 muestra que algunos datos derivados del algoritmo de detección en tierra (curva negra) difieren notablemente de los proporcionados por ACM (curva azul). Una inspección de estos datos particulares muestra que, a parte de los errores introducidos por la iluminación en la cámara mencionados anteriormente, desde tierra se detectan algunas nubes tenues, disminuyendo considerablemente el valor del CSF, mientras que el CSF medido con las imágenes satelitales no se ve afectado o disminuye en menor medida, como se puede apreciar en la misma figura. De estas 62 imágenes, 35 presentan resultados favorables, es decir,

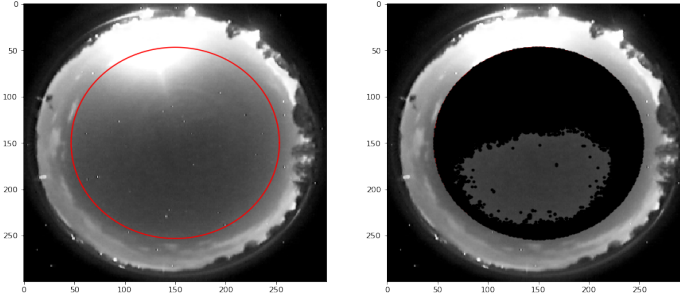


Figura 4.13: Imagen del cielo sobre UdeA-oriente a las 21:37 del 26 de octubre de 2018. A la derecha se muestra el resultado del algoritmo de identificación de nubes afectado por la luz de la Luna. La circunferencia roja representa la región del cielo dentro de 45° de ángulo cenital

no se detectan nubes tanto desde tierra (curva verde) como desde satélite, aunque se observa una diferencia promedio de ~ 0.1 entre ambas mediciones, con una desviación estándar de ~ 0.05 . Con esta información, se analizó la diferencia entre los resultados encontrados por medio del algoritmo de detección y la máscara ACM, y considerando una tolerancia de hasta $2\text{-}\sigma$ al rededor de la media, se encontró una precisión alrededor del 84 % del método utilizado para la clasificación del cielo entre despejado o nublado, mientras el reportado por Heidinger (2011), comparando sus resultados con los provistos por otros proyectos (como se mencionó en la sección 4.2.1), está por encima del 89 %. Estos resultados podrán ser validados y mejorados a través de la instalación de cámaras de cielo que nos permitan hacer el mismo estudio comparativo realizado en este trabajo.

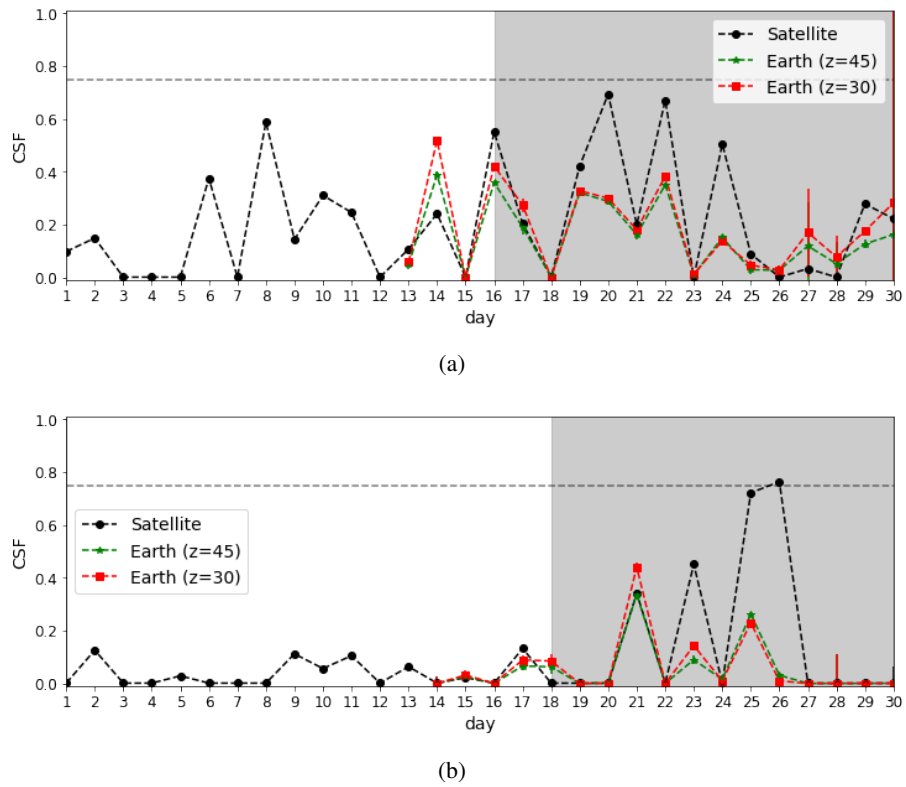


Figura 4.14: Igual que 4.12 pero para septiembre de 2018

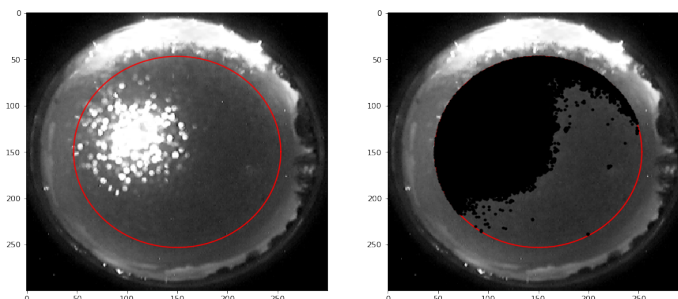


Figura 4.15: Imagen del cielo sobre UdeA-orient a las 21:05 del 22 de septiembre de 2018. A la derecha se muestra el resultado del algoritmo de identificación de nubes afectado por aire condensado al interior de la cúpula de la cámara. La circunferencia roja representa la región del cielo dentro de 45° de ángulo cenital

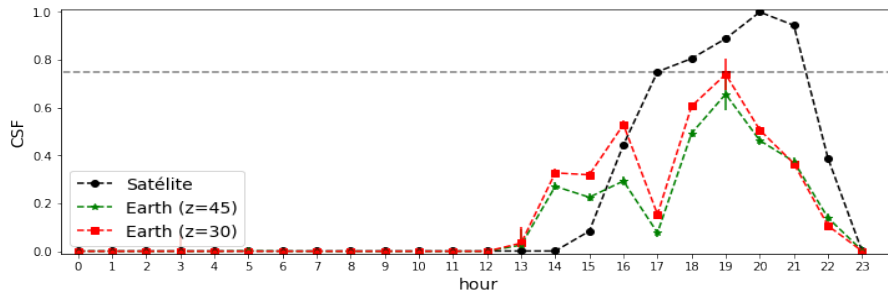


Figura 4.16: Promedio por hora del porcentaje de cielo despejado para el 22 de septiembre de 2018. En rojo y en verde, el obtenido en tierra y calculados con el algoritmo de identificación de nubes con diferentes ángulo cenital z (ver leyenda). En negro el valor derivado de satélite. La línea horizontal gris marca un valor de CSF del 75 %. Las barras de error están asociadas al número de datos ausentes. marca un valor de CSF del 75 %.

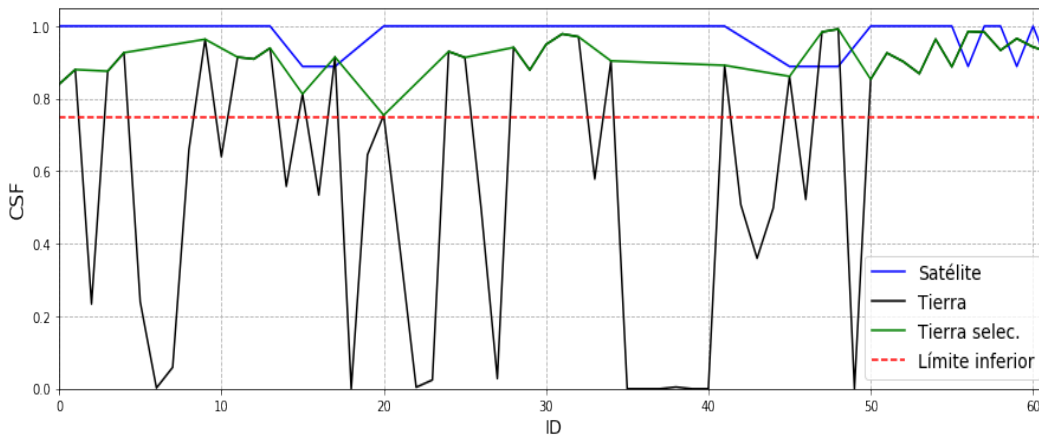


Figura 4.17: Gráfico de fracción de cielo despejado para las imágenes seleccionadas clasificadas como despejadas por el ACM (curva azul), en momentos donde la luna no se encuentra sobre el horizonte. En negro se muestra el valor correspondiente al medido por el algoritmo de detección en tierra para la imagen tomada a la hora más cercana. En verde las seleccionadas por coincidir con la clasificación hecha desde satélite. La línea roja marca el valor límite definido para un cielo despejado, es decir un CSF de 75 %.

Capítulo 5

Sitios potenciales para la observación astronómica

La precisión del método empleado para la estimación de cielos despejados enunciada en el capítulo anterior nos permite extender el estudio a una región más amplia que abarque todo Colombia y sus alrededores, con el fin de encontrar sitios potenciales para la observación astronómica en el óptico. En este capítulo se muestran los resultados y la forma en que se aplicó dicho estudio. Además, como se verá a continuación, esta metodología permite no solamente encontrar los sitios con mayor cantidad de noches despejadas, también es posible estimar las mejores épocas del año para la observación en un sitio en particular, que no solo implica un alto número de noches despejadas, sino un intervalo considerable de noches consecutivas con las condiciones necesarias para observar el cielo.

5.1. Fracción de nubosidad mensual

La región analizada cubre desde los 15°S hasta 15°N de latitud y de 60°O a 90°O de longitud, enfocando el estudio solo a la parte continental de Colombia y sus alrededores. En primer lugar, teniendo en cuenta que la región a analizar es mucho más grande que la inicial, se suavizó la información del satélite definiendo la FCN en áreas de $10\text{ km}\times 10\text{ km}$, es decir de 5×5 píxeles, con el fin de disminuir el tiempo de computo y facilitar la identificación de sitios potenciales. Este suavizado se realizó tomando el valor promedio entre los 25 píxeles de cada área. La muestra estudiada contiene imágenes del ACM del año 2018, tomadas cada 15 minutos entre las 0 y las 10 horas UTC (o sea las 19 y las 5 del día siguiente en hora local de Colombia). Teniendo en cuenta que son 4 imágenes por hora, durante 10 horas al día, el total para todo el año sería de 14600 imágenes. De éstas se analizaron 14186 imágenes, que corresponde al 97.2%. De las 414 imágenes ausentes (el 2.8% del total de tiempo) se encontró que las imágenes no estaban en la base de datos del satélite y/o fueron eliminadas de la muestra por contener datos erróneos (valores diferentes de 0 o 1).

Se construyó una serie de mapas de la región que muestran la fracción de cielo nublado de cada una de las áreas de $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ (las cuales definiremos como píxeles durante el resto del texto) promediada por cada mes y así dar con una primera aproximación a las épocas del año con menor presencia de nubes. Dichos mapas se muestran en la figura 5.1. En ésta se puede ver que el mes en el que una mayor parte de Colombia tiene una FCN más bajo es en diciembre, con menos del 20% en la región Caribe y entre el 20% y el 50% en la Orinoquía y parte de la región Andina. Luego está febrero, con valores similares a los de diciembre en el Caribe, pero mayores en las otras dos regiones mencionadas (con valores más altos que el 40%), seguido de enero, donde se obtienen

valores de FCN alrededor de 35 % mayores a los del mes subsiguiente, y finalmente marzo, donde en general solo se alcanzan valores menores al 60 % en la región Caribe.

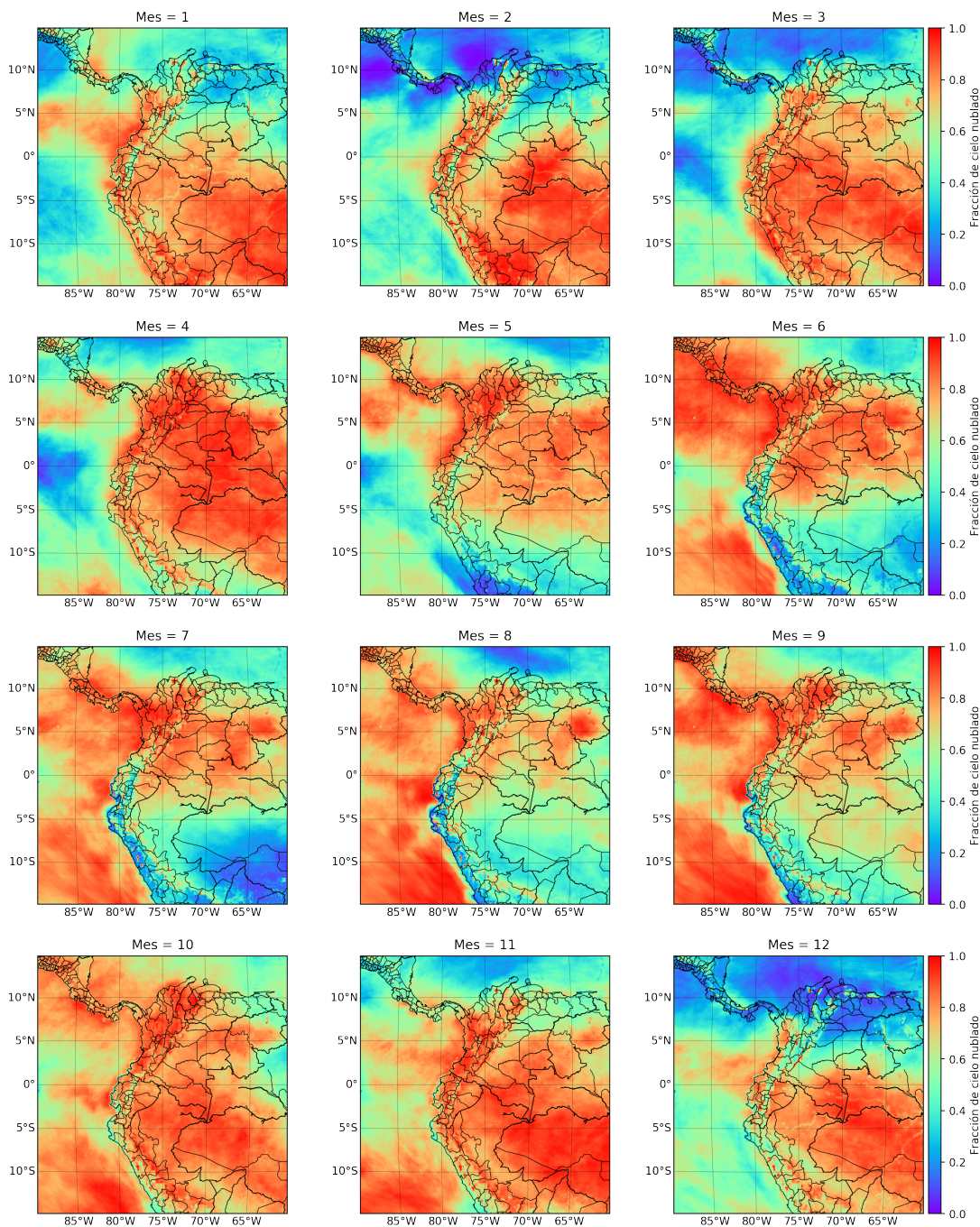


Figura 5.1: Mapas de fracción de cielo nublado promediada por cada mes del año 2018 al noroeste de América del Sur.

Es claro entonces que, en general, la región Caribe es la más despejada del país. No obstante, se observan algunos sitios interesantes sobre la cordillera de los Andes que serán analizados con mejor detalle más adelante, luego de aplicar la definición de noche despejada descrita en la siguiente sección.

5.2. Cantidad de noches despejadas

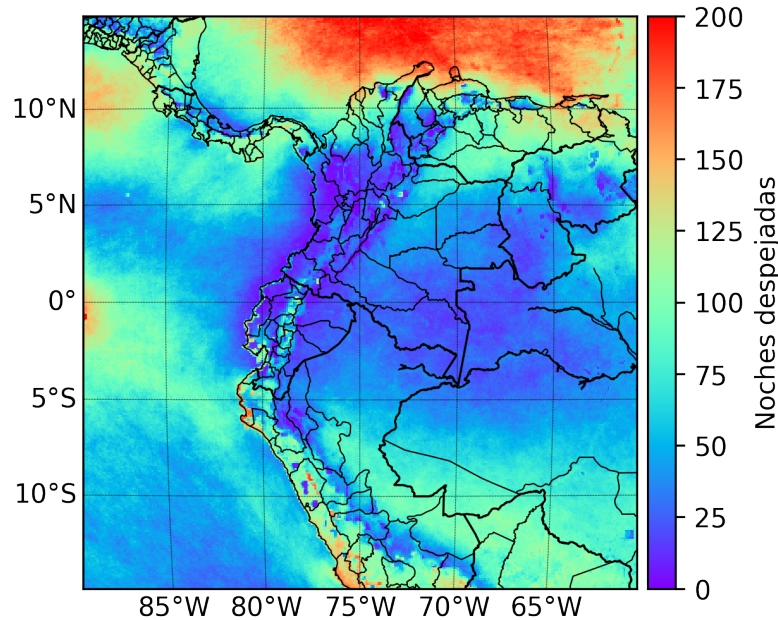


Figura 5.2: Mapa del número de noches despejadas durante el año 2018 al noroeste de América del Sur.

El criterio de fracción de cielo nublado (o despejado) no es suficiente para la evaluación de sitios potenciales para la observación, pues dependiendo de la geografía del lugar éste puede tener cielos despejados pero inestables, es decir, puede no contar con suficiente tiempo durante una o varias noches para programar una observación astronómica completa. Por esta razón es importante hacer una definición de noche despejada en base al número de horas consecutivas disponibles para este fin.

Para estimar la cantidad de noches despejadas se hizo uso de las estimaciones de FCN y CSF. En este trabajo se usa la definición siguiente de noche despejada:

Una noche despejada es aquella cuyo valor de CSF es mayor o igual a 75 % y tenga un mínimo de 5 horas consecutivas despejadas.

Las noches que cumplan esta definición serán también consideradas noches estables durante el resto del texto.

Esta definición nos permitió estimar el número de noches despejadas que tuvieron lugar en el año 2018 sobre cada píxel en la región analizada.

La figura 5.2 muestra los resultados de este análisis sobre la región muestreada. En ella se puede ver que en general las regiones con mayor número de noches despejadas se encuentra fuera de la zona continental o en zonas costeras, donde se alcanzaron más de 200 noches despejadas en el año 2018. Sin embargo, se encuentran regiones en el mapa, principalmente sobre la cordillera de los Andes, con un número considerable de noches despejadas que pueden contener sitios potenciales. Tales sitios fueron seleccionados teniendo en cuenta dos criterios:

- Haber tenido más de 80 noches despejadas en el 2018 (más del 20 % del año).

- Ser lugares con alturas de más de 2000 m.s.n.m.

Con base en el criterio de número de noches despejadas se elaboró el mapa mostrado en la figura 5.3(b), el cual muestra en azul las regiones que lo cumplen. Además se muestra un mapa topográfico en la figura 5.3(a), donde es notable que los lugares más altos en la región (de color marrón y morado) se hallan en la cordillera de los Andes. Al comparar estos dos mapas, se puede ver que en los Andes Peruanos hay una amplia región que cumple con ambos criterios de selección. Sin embargo, se limitará la búsqueda de sitios potenciales para la observación astronómica a una región acotada entre -80° y -64° de longitud, y -5° y 12.5° de latitud. Esta región cubre completamente a Colombia, parte de Ecuador y Venezuela, y la región amazónica de Brasil y Perú. Claramente las dos últimas no cumplen con los criterios propuestos.

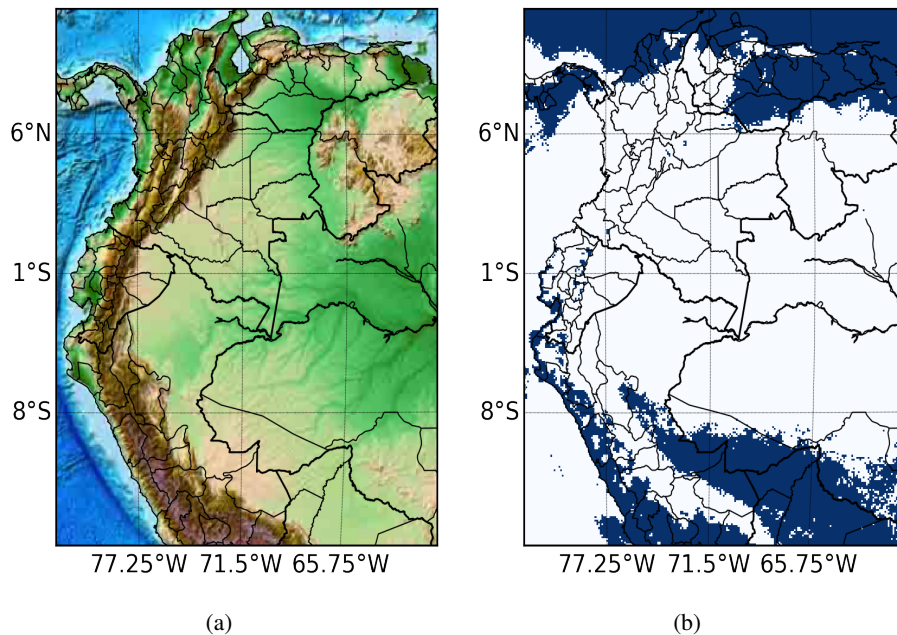


Figura 5.3: (a) Mapa topográfico del noroeste de América del Sur. (b) En azul se muestran las regiones sobre el mapa con más de 80 noches despejadas en el año 2018.

5.3. Sitios potenciales en Colombia

En Colombia se encontraron cinco sitios que cumplen los criterios de selección, de los cuales tres están sobre el altiplano cundiboyacense, uno en el departamento de Nariño, en la vertiente amazónica y el último en la Sierra Nevada de Santa Marta.

5.3.1. Altiplanicie cundiboyacense

Esta región ubicada en la cordillera oriental se extiende a lo largo de unos 250 km sobre los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Es un conjunto de 4 altiplanos, que son la Sabana de Bogotá, el valle de Ubaté-Chiquinquirá, el altiplano de Samacá-Villa de Leyva y el de Tunja-Sogamoso-Lago de Tota, los cuales están entre los 2000 y 3000 m.s.n.m. (Banco de Occidente., 2004).

En este altiplano se encontraron 4 sitios potenciales, cuya ubicación se muestra en la figura 5.4. El hecho de que los 4 sitios se encuentren cerca a lagos o embalses se debe a un mecanismo atmosférico que se explicará posteriormente (ver sección 5.7).

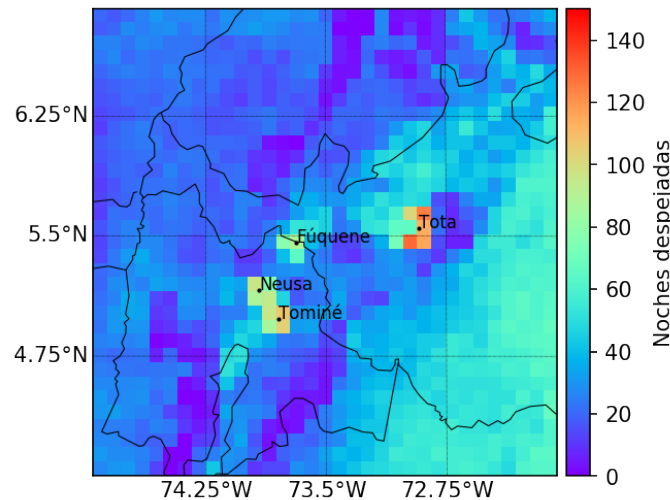


Figura 5.4: Sitios potenciales para la observación astronómica en la altiplanicie Cundiboyacense. Se muestran el Lago de Tota, Laguna de Fúquene, embalse del Nause y embalse Tominé. Cada píxel corresponde a un área de $10\text{ km} \times 10\text{ km}$.

Lago de Tota

El lago de Tota se ubica en el departamento de Boyacá, ocupando un área de alrededor de 55 km^2 , en jurisdicción de los municipios de Cuítiva, Tota y Aquitania. En el lugar se alcanzan relieves que van desde los 2.950 hasta los 3.900 m.s.n.m. Sus coordenadas van desde $5^{\circ}28'13''\text{N}$ a $5^{\circ}39'14''\text{N}$ en latitud y de $72^{\circ}50'38''\text{W}$ a $73^{\circ}00'00''\text{W}$ en longitud (Nuñez et al., 2014).

Se encontraron 5 píxeles en la región de Lago de Tota con valores entre 102 y 129 noches despejadas en el año 2018, para un promedio de 117 noches. El valor más bajo corresponde al píxel justo al noroeste del que está marcado como Tota en la figura 5.4, por lo que se omitirá en los análisis posteriores. Por otro lado, se encontró que diciembre fue el mes con mejores condiciones para la observación con 26 noches despejadas, de las cuales se encuentran 12 consecutivas entre los días 1 y 12 de dicho mes (siendo este el intervalo de tiempo más largo), seguida por intervalos de 5 y 4 noches para lo que queda del mes.

La segunda mejor época encontrada fue en el mes de febrero con un total de hasta 23 noches despejadas, de las cuales 12 fueron consecutivas, entre los días 16 y 27, para los píxeles más enrojecidos de la figura 5.4. Luego está enero, con 18 noches despejadas en 2 de los píxeles del sitio y 19 en los demás, con un máximo de 6 consecutivas. Del resto de meses, el peor resultado fue para abril, con máximo 2 noches despejadas.

Laguna de Fúquene

Esta laguna se encuentra en el departamento de Cundinamarca, 100 kilómetros al norte de Bogotá, sobre la cordillera oriental a unos 2.543 m.s.n.m. Sus coordenadas geográficas son $5^{\circ}28'12''\text{N}$ en latitud y $73^{\circ}44'14''\text{W}$ en longitud, y ocupa un área de aproximadamente 9 km^2 (Santos, 2000).

Al oriente de la laguna se encuentran lugares que alcanzan alturas hasta los 3100 m.s.n.m. Allí se encontró un solo píxel de $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ con 88 noches despejadas en el año 2018. Con resultados similares a los del anterior sitio, el mejor mes en este lugar fue diciembre con 24 noches despejadas en total, siendo 11 consecutivas entre los días 1 y 11, 5 entre el 16 y el 20, y 8 más entre el 24 y el 31. De los demás meses destacan enero y febrero con 12 noches despejadas, distribuidas a lo largo del mes, alcanzando máximo 4 consecutivas.

Embalses del Neusa y del Tominé

El embalse del Neusa, ubicado en el departamento de Cundinamarca, a unos 40 km del norte de Bogotá, fue construida a principios de los años 50s para la regulación del caudal del río Bogotá y el abastecimiento de agua y energía para diferentes municipios del departamento (Durán & Suarez, 2011). Tiene un área aproximada de 10 km^2 ; sus coordenadas son $5^{\circ}09'00'' \text{ N}$ en latitud y $73^{\circ}59'00'' \text{ W}$ en longitud, y se encuentra a una altura de 3000 m.s.n.m. La represa del Tominé se ubica a unos 20 km de distancia del embalse del Neusa. Fue construida a principios de los años 60s; sus coordenadas son $4^{\circ}56'00'' \text{ N}$ de latitud y $73^{\circ}50'00'' \text{ W}$ longitud, y se encuentra a una altura de 2584 m.s.n.m (Wikipedia, 2019)

En la región de estos embalses se alcanzan alturas de hasta 3600 m.s.n.m. Se encontraron 7 píxeles con entre 87 y 107 noches despejadas. Se obtienen resultados muy similares al sitio Laguna de Fúquene, con 25 noches despejadas en diciembre, distribuidas de igual forma que en el anterior sitio. En enero se encontraron 12 noches despejadas en el Embalse del Neusa y 14 en el del Tominé, ambos con 5 consecutivas al final del mes. En febrero se alcanzaron 13 noches despejadas y un máximo de 4 consecutivas en ambos sitios, entre el día 8 y el 11 de dicho mes.

5.3.2. Laguna de la Cocha

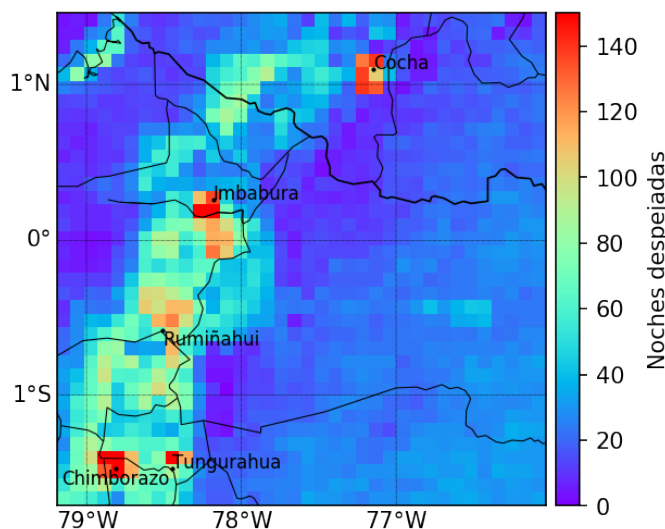


Figura 5.5: Sitios potenciales para la observación astronómica sobre los Andes, cerca al ecuador terrestre. Se muestra la Laguna de la Cocha, en la región colombiana; en la región ecuatoriana el cerro Rumiñahui y los volcanes Imbabura, Chimborazo y Tungurahua. Cada píxel corresponde a un área de $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$

La laguna de la Cocha (o lago Gamués) se ubica en la parte colombiana de la vertiente amazónica, cerca al Nudo de los Pastos, con coordenadas $1^{\circ}06'00'' \text{ N}$ de latitud y $77^{\circ}09'07'' \text{ W}$ de longitud.

Se eleva a una altura de 2800 m.s.n.m. y cubre un área alrededor de 42 km² (Camacho, 2013).

En la región de la Cocha se encuentran zonas con alturas de hasta 3700 m.s.n.m. Allí se encontraron 6 píxeles con valores entre 105 y 140 noches despejadas. El menor valor corresponde al píxel que cae justo sobre el lago, mientras los 5 píxeles del alrededor (los más enrojecidos en la región "Cocha" de la figura 5.5) tienen un valor promedio de 135 noches. El mes con mayor número de noches despejadas en 2018 para este lugar fue agosto, con un promedio de 20 noches en total, sin contar el píxel del lago, distribuidas a lo largo del mes, con un máximo de 6 consecutivas entre los días 15 y 20. Para los meses julio y diciembre se obtuvieron resultados similares, con 17 noches despejadas, pero con un máximo de 12 consecutivas en julio y 7 en diciembre. En enero se observaron 11 noches despejadas, con al menos 7 consecutivas para los 6 píxeles y 11 para dos, los últimos días del mes. En febrero hubo un máximo de 15 noches despejadas y 7 consecutivas.

5.3.3. Sierra Nevada de Santa Marta

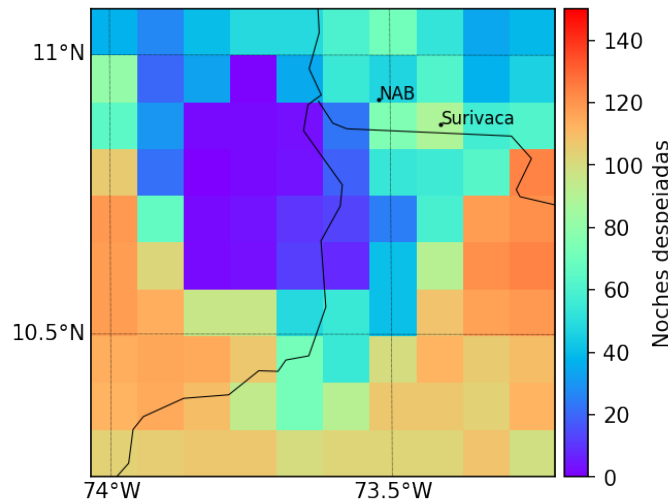


Figura 5.6: Número de noches despejadas sobre el mapa de la región de la Sierra Nevada de Santa Marta. Se marca el Surivaca (encontrado en este trabajo como potencial sitio astronómico) y el sitio NAB enunciado en el trabajo de Pinzón et al. (2015).

La Sierra Nevada de Santa Marta es el macizo litoral más grande del mundo. Se localiza al norte de Colombia, cerca del Mar Caribe, con una longitud 73°39'W y una latitud 10°49'N. Su punto más alto llega hasta los 5775 m.s.n.m. en los picos gemelos Cristobal Colón y Simón Bolívar (IDEAM, 2018).

A pesar que en esta región se observan gran cantidad de cielos nublados, se encontró un píxel con un valor de 89 noches despejadas en la zona de la Guajira. Con intrincada topografía, tiene alturas que van desde 1800 hasta 4000 m.s.n.m. y está localizado en las coordenadas 73°23'W, 10°54'N, cercanas a las enunciadas por Pinzón et al. (2015) para el sitio con mejores resultados en Colombia (nombrado NAB, abreviación de Nabusimake, con coordenadas 73°31'12''W, 10°55'12''N) encontrado en dicho estudio (ver figura 5.6). En este sitio (que llamaremos Surivaca, por ser la región más cercana al centro del píxel) se obtuvo un mejor resultado para el mes de diciembre con 27 noches despejadas, con un máximo de 18 noches consecutivas los primeros días del mes, seguido de los meses febrero y marzo, con 18 y 14 noches despejadas, respectivamente, con máximo 7 consecutivas en el primero.

Tabla 5.1: Comparación entre los resultados del estudio de Pinzón et al. (2015) y los de el presente trabajo

sitio	Pinzón et al. (2015)	Este trabajo
TIM	156 ± 24	75 ± 5
CID	79 ± 22	87 ± 6
NAB	72 ± 16	55 ± 5
COD	66 ± 18	57 ± 4
CHI	62 ± 11	36 ± 3
ESP	57 ± 6	33 ± 2
PIS	59 ± 9	38 ± 5
COC	54 ± 4	42 ± 3
TUF	56 ± 29	40 ± 3
IBA	56 ± 29	24 ± 2
HUI	40 ± 11	51 ± 5

También se observan varias regiones con un número considerable de noches despejadas alrededor de la Sierra Nevada, en los bordes de la figura 5.6. Aunque estos sitios presentaron más de 80 noches despejadas en el año, no se tomaron en cuenta debido a que en general se encuentran a alturas por debajo de los 1000 m.s.n.m.

5.4. Sitios en Colombia encontrados en otros trabajos

Dos de las regiones encontradas con mejores condiciones de cielo despejado coinciden con sitios estudiados por Pinzón et al. (2015), la Laguna de la Cocha y el sitio OAN (descrito más adelante). Antes de hacer la comparación, se debe tener en cuenta que ellos utilizaron definiciones diferentes para evaluar los sitios de interés. Además, su resolución temporal también difiere, pues solamente tomaron 3 imágenes por noche, una al inicio, otra a la mitad y la última al final de la noche. Con esta información definen una noche fotométrica como aquella donde dos de las tres imágenes de satélite mostraran un cielo despejado, sin importar si éstas eran contiguas o no. Dado esto, es de esperarse que los resultados de dicho estudio difieran de los encontrados en el presente trabajo, donde se hace una definición más rigurosa de noche despejada o fotométrica.

Para el sitio OAN (nombrado CID en el artículo citado) Pinzón et al. (2015) encontraron 79 ± 22 noches fotométricas al año, valor que es acorde al encontrado en este trabajo que fue de 87 noches despejadas. En cambio, para la región de la Cocha encontraron únicamente 38 noches fotométricas al año, muy por debajo de las 135 encontradas acá. Esta diferencia puede deberse no solo a la definición de noche fotométrica, sino también a la resolución espacial utilizada, pues en su trabajo Pinzón et al. (2015) utilizan áreas de mayor extensión que puede dar lugar a errores, pues como se mostró anteriormente, los sitios más despejados están en general localizados en áreas de no más de $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$.

En cuanto a los demás sitios, cuya ubicación sobre el mapa se muestra en la figura 5.7, nombrados de la misma forma que en Pinzón et al. (2015), se obtuvo en todos un valor de noches despejadas menor al valor de noches fotométricas reportado en su artículo, a excepción del nevado del Huila (HUI) donde el valor es mayor (ver tabla 5.1). Estos valores solo están dentro del intervalo de confianza para los sitios Codazzi (COD), Nevado del Huila (HUI) y en P. Tuffino (TUF).

También es importante notar que los sitios seleccionados en este trabajo localizados sobre el altiplano cundiboyacense (Tota, Fúquene, Neusa y Tominé) se hallan dentro o muy cerca del Valle del Sol y Valle de Ubaté (ver figura 5.8), zonas encontradas por Chaparro Molano et al. (2017) como sitios de interés para la observación en longitudes de microondas por tener las mejores condiciones

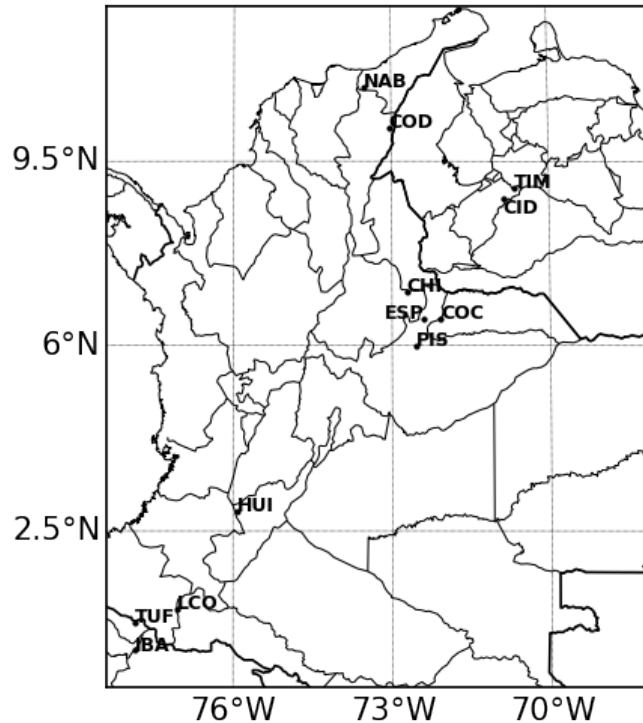


Figura 5.7: Mapa de la región estudiada por Pinzón et al. (2015) que marca los sitios seleccionados por los mismos como los más apropiados para la observación astronómica

en Colombia para realizar astronomía, ya que tienen una alta elevación y baja humedad relativa.

5.5. Sitios de interés en Antioquia

En el departamento de Antioquia no se encontró ningún sitio que cumpliera con los criterios utilizados para la selección de sitios potenciales para la observación astronómica, pues aunque se alcanzó un máximo de 101 noches despejadas en los municipios de Arboletes (ARB) y San Juan de Urabá, estos se encuentran en la zona costera (ver figura 5.9). Sin embargo, la Universidad de Antioquia tiene sedes y seccionales distribuidas por las diferentes regiones del departamento, por lo que también es interesante saber cuántas noches despejadas se pueden encontrar donde algunas de éstas están ubicadas. Por ejemplo, la sede en el municipio de apartado contó con 77 noches despejadas en el 2018. No obstante, ésta se encuentra a unos 50 km de la costa y a sólo 30 m.s.n.m. En la sede de Magdalena medio, en el municipio de Puerto Berrio (PBE), se encontraron 25 noches despejadas. En la sede de oriente, en el valle de San Nicolás (VSN), donde se encuentra la cámara usada para realizar la validación, se alcanzaron sólo 7 noches despejadas en 2018, mientras en Medellín, la capital del departamento, se encontraron 10. En cuanto a sitios que cumplieran con el criterio de altura y presentaran un número de noches despejadas por encima del promedio en el departamento, se encontraron 2, el primero, con 40 noches despejadas, se encuentra 18 km al noreste del municipio de Dabeiba (DAB), sobre un relieve bastante accidentado que alcanza hasta los 3000 m.s.n.m. El segundo, con 33 noches despejadas, se encuentra al oriente antioqueño, entre los municipios de Concepción (CON) y Alejandría, a una altura promedio de 2000 m.s.n.m.

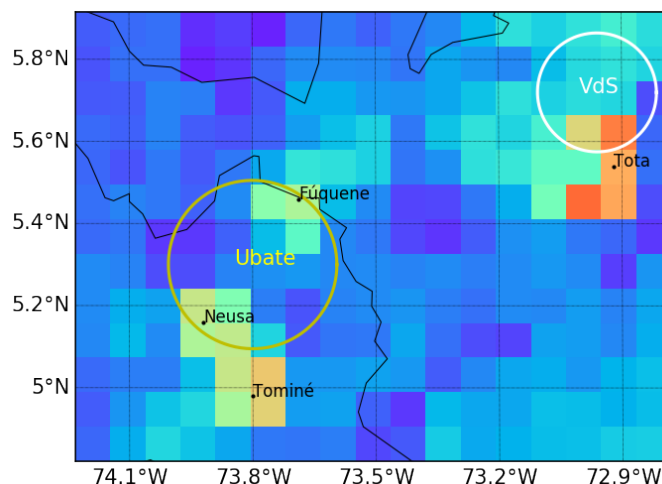


Figura 5.8: Dos de las regiones anotadas por Chaparro Molano et al. (2017) como las más adecuadas para la astronomía en el milimétrico y sub-milimétrico en Colombia.

5.6. Sitios potenciales fuera de Colombia

5.6.1. Andes Ecuatorianos

La cordillera de los Andes atraviesa a la República del Ecuador de sur a norte, por lo que gran parte de la geografía y el clima del país vienen dados por este sistema montañoso, en el que se pueden encontrar alturas de hasta 6300 m.s.n.m., altura del volcán Chimborazo, siendo el más alto del país. En esta región se encontraron algunos sitios de interés para este estudio, los cuales se encuentran particularmente en los alrededores de grandes cerros o volcanes, como se muestra en la figura 5.5.

Volcanes Imbabura y Chimborazo

El Chimborazo es el volcán más alto en la República del Ecuador. Se sitúa en la región central del país, en la provincia del mismo nombre, a 150 km de la capital Quito, rodeado por la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, que está a una altura media de 4000 m.s.n.m. Las coordenadas geográficas del volcán son $1^{\circ}28'09''S$ y $78^{\circ}49'03''W$ (Instituto Geofísico-EPN, 2019).

El volcán Imbabura se encuentra al norte del país, más cerca de la frontera con Colombia, en la provincia de Imbabura, a 9 km de la ciudad Otavalo y unos 90 km de Quito. Tiene una altura de poco más de 4500 m.s.n.m. El relieve a su alrededor varía entre los 2300 m.s.n.m. en las zonas más bajas y hasta 4000 m.s.n.m. en algunos cerros. Sus coordenadas son $0^{\circ}15'29''N$ y $78^{\circ}10'47''W$. Tanto éste como el Chimborazo son considerados volcanes potencialmente activos¹ por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) del Ecuador (Instituto Geofísico-EPN, 2019).

Dado que los resultados en las regiones alrededor de ambos volcanes fueron muy similares, se enuncian bajo este mismo apartado. El total de noches despejadas en estas regiones varía entre 137 y 197, siendo máximo en los píxeles justo al norte de Chimborazo, con 197 noches, y justo al suroeste del Imbabura, con 172 noches (ver figura 5.5). El mes con mejores resultados para ambos sitios fue agosto, con un máximo de 24 noches despejadas en Chimborazo y 25 en Imbabura. Además, este mismo mes se alcanzó el máximo de noches consecutivas, siendo de 16 para Imbabura y 12 en

¹Última erupción durante el Holoceno, es decir hace menos de 11 700 años

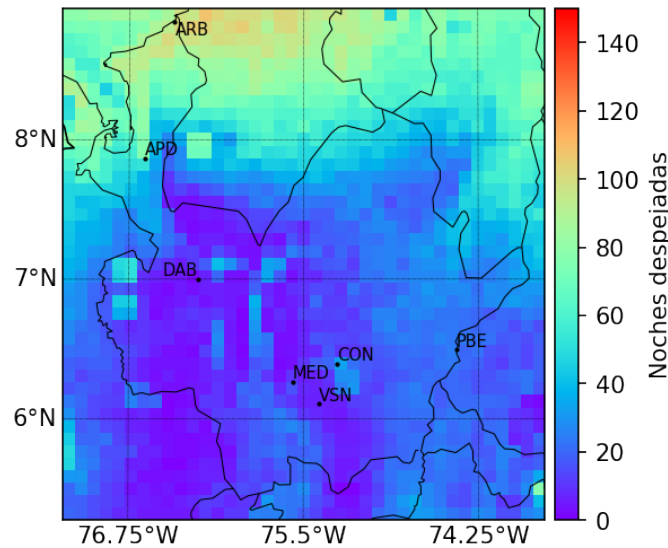


Figura 5.9: Número de noches despejadas en el año 2018 en el departamento de Antioquia.

Chimborazo. Julio también fue un mes con buenos resultados, con hasta 21 noches despejadas, al igual que septiembre con 17 en Imbabura y 20 en Chimborazo. Del resto de los meses, los mejores fueron diciembre, enero y febrero, con entre 14 y 17 noches despejadas, para ambos sitios.

Volcán Tungurahua

Éste es un volcán activo² ubicado en el centro del país, 40 km al este del Chimborazo. Alcanza una altura de 5000 m.s.n.m. y sus coordenadas son 1°28'01"S y 78°26'30"W (Instituto Geofísico-EPN, 2019).

Al norte de la cima del volcán se encontró un píxel con 153 noches despejadas (ver figura 5.5). Esta área presenta alturas que van desde los 1800 m.s.n.m., en la localidad Baños de Agua Santa que se encuentra a la altura del río Pastaza, hasta más de 3000 m.s.n.m. en los alrededores de dicha localidad. Se encontró que en esta región el mes más despejado fue julio con 21 noches despejadas, seguido de agosto con 18. Sin embargo, el máximo de noches consecutivas fue sólo de 8 en los meses de enero y febrero, que tuvieron 15 y 14 noches despejadas, respectivamente.

5.6.2. Andes Venezolanos

Observatorio Astronómico Nacional

El Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato (OAN) del Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA) de Venezuela está ubicado en el Municipio Rangel del estado de Mérida, aproximadamente a 70 km de la ciudad de Mérida y a una altura de 3600 m.s.n.m. (CIDA., 2019). Sus coordenadas son 8°47'18"N, 70°52'74"W, como se muestra en la figura 5.10.

Al sur de OAN se encontró un píxel que llega a las 87 noches despejadas, siendo el más despejado en esta región que además está a más de 3000 m.s.n.m. El mes con mejores resultados fue diciembre, con 27 noches despejadas, seguido de enero y febrero con 14 y 16, respectivamente. En abril y mayo no se encontró ninguna noches despejada.

²última erupción durante el periodo histórico (desde 1532 Anno Domini)

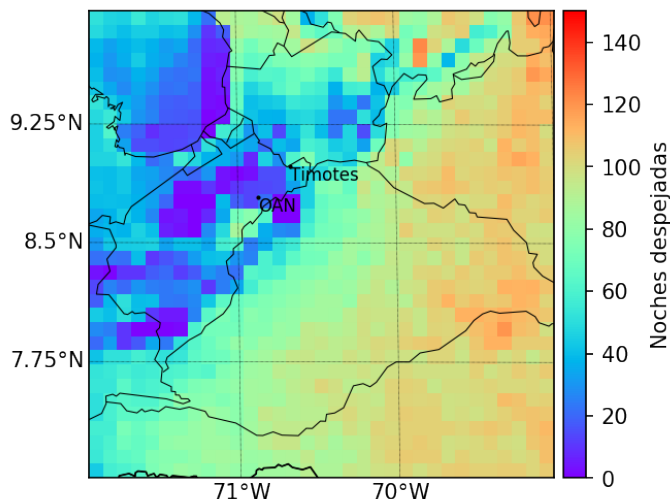


Figura 5.10: Sitios potenciales para la observación astronómica sobre los Andes en Venezuela. Se muestra el Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato (OAN). Cada píxel corresponde a un área de 10 km×10 km

Localidad Timotes

Es un poblado en el norte del estado de Mérida, a 116 km de la ciudad de Mérida, cerca al límite con el estado de Trujillo (ver figura 5.10). A 20 km hacia el noreste de esta localidad se encontró un sitio con 75 noches despejadas y una altura media de 3500 m.s.n.m. El máximo número se dio en el mes de diciembre, con 23 noches despejadas, seguido de enero y febrero con 14 y 12, respectivamente.

5.7. Análisis de los resultados

La tabla 5.2 muestra los 9 sitios seleccionados como sitios potenciales para la observación astronómica. En ésta se puede ver que el sitio más destacado en Colombia fue la región de La Cocha, con 135 noches despejadas, seguido de la Tota con 117. Una característica importante que tienen en común estos sitios es su geografía. Ambos corresponden a regiones con montañas que alcanzan alturas de más de 3700 m.s.n.m., aledañas a un cuerpo de agua relativamente grande que se encuentra a una altura de unos 800 metros menor a la de éstas. Para ilustrar la geografía de estos lugares se realizaron perfiles de elevación a través de dos direcciones sobre la región. Éstos se muestran en las figuras 5.11 y 5.12. Este factor orográfico es importante porque el aire sobre la montaña se enfría rápidamente en la noche, inhibiendo el proceso de convección y la formación de nubes sobre ésta, y generando un flujo hacia la parte inferior de la montaña que puede dar lugar a formación de nubes en su base o incluso lejos de ésta, si se encuentra con una corriente de aire húmedo al nivel de la base de la montaña. Lo contrario pasa durante el día, generándose formación de nubes y precipitaciones sobre la montaña (Houze Jr., 2012). Sabiendo esto, es posible que en los demás sitios encontrados tenga lugar un fenómeno de este estilo, ya que éstos presentan una orografía similar, encontrándose alrededor de una gran elevación de tierra.

Al comparar los resultados mostrados con los mapas en el apéndice A se puede ver que los sitios seleccionados se ubican en las regiones con valores de precipitación anual más bajos después de la Guajira, con entre 500 mm y 1000 mm al año, en el altiplano cundiboyacense y entre 1000 mm y

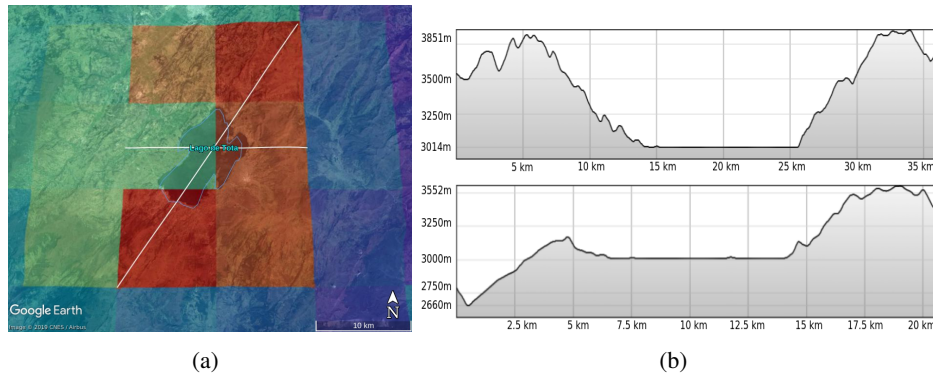


Figura 5.11: (a) Superposición elaborada en Google Earth de una imagen de noches despejadas sobre imagen de satélite en el sitio Lago de Tota. Las líneas blancas representan los cortes hechos para los perfiles de elevación mostrados en (b). El perfil de arriba fue hecho por la diagonal de norte a sur y el de abajo por la horizontal de oeste a este.

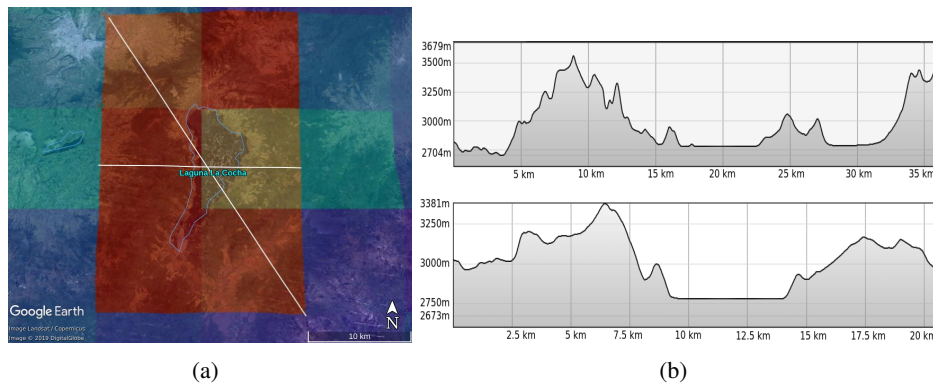


Figura 5.12: Igual que la figura 5.11 pero para la región de la Cocha.

1500 mm en la región de andina de Nariño y la vertiente Amazónica, donde se encuentra la Laguna de la Cocha.

Por otro lado, al hacer un análisis mensual de los resultados se obtiene que los sitios seleccionados ubicados sobre la altiplanicie cundiboyacense presentaron mejores resultados en el mes de diciembre, seguido por enero y febrero (ver figuras 5.13 y 5.14), que corresponden a una de las temporadas secas del año sobre Colombia. Esto está acorde a las medidas hechas por el IDEAM en el municipio de Sogamoso, que se encuentra a sólo 15 km de la región de la Laguna de Tota, y en la ciudad de Bogotá, que está cerca de los embalses de Neusa y Tominé (para ver los gráficos véase el apéndice A.1). A diferencia de éstos, los sitios encontrados más hacia el sur, es decir en la Cocha y en los Andes ecuatorianos, tuvieron mejores resultados en la época seca de mitad de año, específicamente en el mes de agosto (ver figuras 5.14 y 5.15), pero al igual que en el caso anterior, este comportamiento se ajusta a las medidas de precipitación del IDEAM en la ciudad de Pasto, localizada a 14 km de la Laguna de la Cocha (ver los gráficos de precipitación en el apéndice A.1).

Aunque este puede no haber sido un año representativo debido a la presencia del fenómeno ENSO y a la variabilidad del clima tropical, los resultados se asemejan a las mediciones históricas del IDEAM. Sin embargo, la variable precipitación no representa la presencia de nubes, pues aunque las lluvias implican nubosidad, el caso contrario no necesariamente se cumple. Por esta razón, es necesario ampliar el estudio añadiendo años posteriores a la muestra en cuanto estén disponibles y

así tener una buena estimación de la cantidad de noches despejadas por año en promedio para estos lugares.

Tabla 5.2: Sitios potenciales para la observación astronómica en el norte de América del Sur identificados para el año 2018, separados entre sitios en Colombia (4 primeros) y fuera de Colombia

Sitio	Longitud	Latitud	Altura media (m)	Noches despejadas
Cocha	-77°09'07"	1°06'00"	2800	135 ± 8
Tota	-72°55'19"	5°33'43"	3014	117 ± 7
Neusa-Tominé	-73°54'30"	5°2'30"	3000	96 ± 6
Surivaca	-73°23'23"	10°53'46"	2800	89 ± 5
Fúquene	-73°44'14"	5°28'12"	2543	88 ± 6
Chimborazo	-78°49'03"	-1°28'09"	4000	175 ± 13
Imbabura	-78°10'47"	0°15'29"	3100	155 ± 13
Tungurahua	-78°26'30"	-1°28'01"	2500	153 ± 11
OAN	-70°52'74"	8°47'18"	3000	87 ± 6

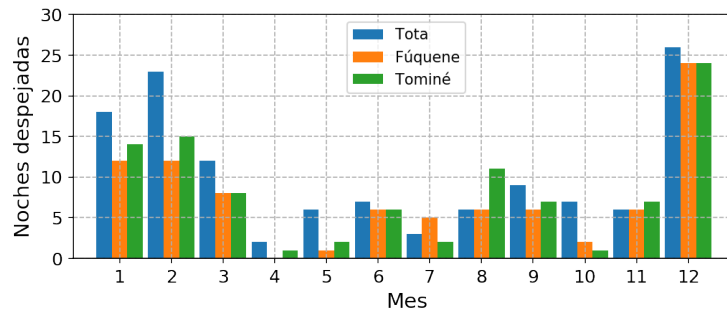


Figura 5.13: Número de noches despejadas por mes en el 2018 para los sitios Tota, Fúquene y Tominé.

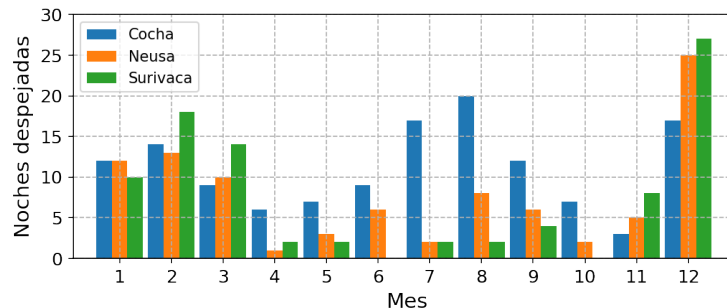


Figura 5.14: Número de noches despejadas por mes en el 2018 para los sitios Cocha, Surivaca y Neusa.

5.8. Cambios en la definición

Para encontrar el número de noches despejadas en cada sitio de la muestra se hizo uso de las definiciones presentadas en este capítulo. La primera fue considerar que una imagen corresponde a un cielo despejado si su CSF es mayor o igual al 75 %. La segunda definición hace referencia al número de horas consecutivas que debe tener una noches para considerarse despejada. En esta

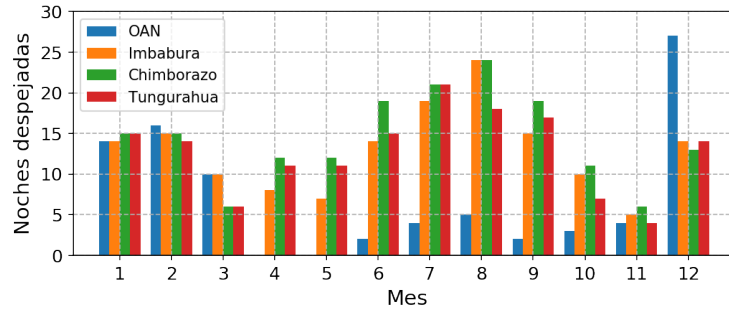


Figura 5.15: Número de noches despejadas por mes en el 2018 para los sitios potenciales encontrados fuera de Colombia.

sección se estudió el cambio en los resultados al tomar definiciones distintas. En primer lugar, se calculó el número de noches con 3, 4, 6 y 7 horas consecutivas despejadas en cada uno de los sitios potenciales. Es claro que al disminuir el número de horas consecutivas, se espera obtener un aumento en el número de noches despejadas y viceversa, tal como se observa en la tabla 5.3. En ésta se puede ver que el cambio en la cantidad de noches difiere para todos los sitios. Por ejemplo, la diferencia más grande entre noches con 5 y 3 horas despejadas en los sitios de Colombia fue de 64, para Neusa-Tominé y Fúquene mientras la más baja fue de 33 en Surivaca. Por otro lado, la diferencia entre la cantidad de noches con 7 y 5 horas despejadas es mayor para los sitios con más noches despejadas.

Tabla 5.3: Número de noches despejadas con diferentes definiciones según el número de horas consecutivas por noche

Sitio	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h
Cocha	198	169	135	105	85
Tota	180	143	117	95	79
Neusa-Tominé	160	127	96	77	61
Surivaca	122	102	89	75	66
Fúquene	152	121	88	69	56
Chimborazo	222	195	175	148	132
Imbabura	207	182	155	121	93
Tungurahua	219	184	153	121	86
OAN	124	107	87	70	62

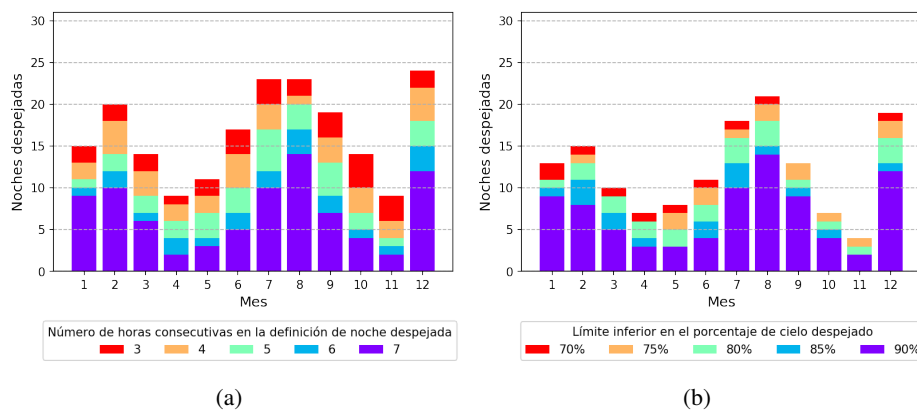
Luego, se calculó el número de noches despejadas variando el CSF límite, entre 70 % y 90 %, con pasos de 5 % y dejando fijo el valor de 5 horas consecutivas. Los resultados se muestran en la tabla 5.4. Se obtienen valores muy similares al usar un límite del 90 %, contando noches con 5 horas despejadas consecutivas y al usar el límite inicial de 75 % con 7 horas consecutivas. Además, se puede ver que la variación de los resultados entre cada definición es más alta al cambiar el número de horas que variando el límite de CSF, en los intervalos trabajados.

También se hizo el estudio de la variación en el número de noches despejadas, dadas las definiciones mencionadas, en cada mes del 2018 para los dos sitios con mejores resultados en Colombia (La Cocha y Tota), y el mejor de la muestra (Chimborazo). Los gráficos en las figuras 5.16, 5.17 y 5.18 muestran los resultados de dicho estudio.

En la variación del número de horas consecutivas se encontró que en la Tota los meses con menor diferencia de noches entre los dos valores extremos fueron abril, septiembre y diciembre, con 4, 5

Tabla 5.4: Número de noches despejadas con diferentes definiciones según el CSF límite

Sitio	70 %	75 %	80 %	85 %	90 %
Cocha	147	135	121	100	83
Tota	130	117	100	84	69
Neusa-Tominé	109	96	83	67	55
Survaca	91	89	80	76	64
Fúquene	106	88	73	67	54
Chimborazo	183	175	158	132	110
Imbabura	168	155	131	97	75
Tungurahua	171	153	121	92	67
OAN	92	87	76	70	60

**Figura 5.16:** Número de noches despejadas por cada mes en el sitio La Cocha cambiando la definición según (a) el número de horas despejadas consecutivas por noche y (b) el límite de fracción de cielo despejado (ver leyendas).

y 7, respectivamente. Abril y septiembre pertenecen a temporadas de lluvia en el país, mientras que diciembre hace parte de una temporada seca. Esto sugiere que la diferencia entre valores con definiciones diferentes, por lo menos en este sitio, para el año 2018 y al variar únicamente el número de horas consecutivas, no necesariamente depende de la temporada del año, pues tanto meses de temporada seca como de temporada de lluvia presentan una variación muy similar entre ellos, con una diferencia promedio de entre 9 y 10 noches.

En la Cocha, los meses con menor variación según el número de horas consecutivas, para los valores extremos, presentan diferencias de entre 6 y 8 noches despejadas, siendo éstos enero, marzo, abril, mayo y noviembre. Dichos meses, a excepción de enero, pertenecen a temporadas de lluvia, además de ser los meses con menor cantidad de noches despejadas en este sitio. Los demás meses presentan una variación promedio de 11 noches. Esto sugiere que la presencia de nubes en este sitio en el año 2018 fue más continua en los meses más nublados que en el resto.

En el Chimborazo, la diferencia más pequeña entre los extremos fue de 4 noches en el mes de abril, mientras las más altas fueron de 11 y 10 noches, en octubre y noviembre, respectivamente. En cuanto a los demás, la diferencia promedio fue de 7 noches despejadas. Al igual que en el sitio la Tota, no se encontró relación entre esta variación y las temporadas del año.

Por otro lado, la diferencia entre el número de noches despejadas con un límite de CSF del 70 % y del 90 % tiene en general valores muy cercanos al promedio de cada sitio, que es de 5 noches

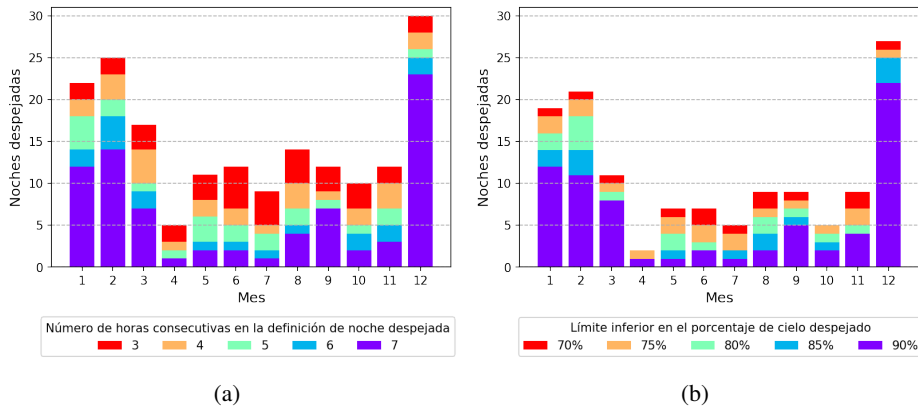


Figura 5.17: Igual que la figura 5.16 pero para la región de la Tota.

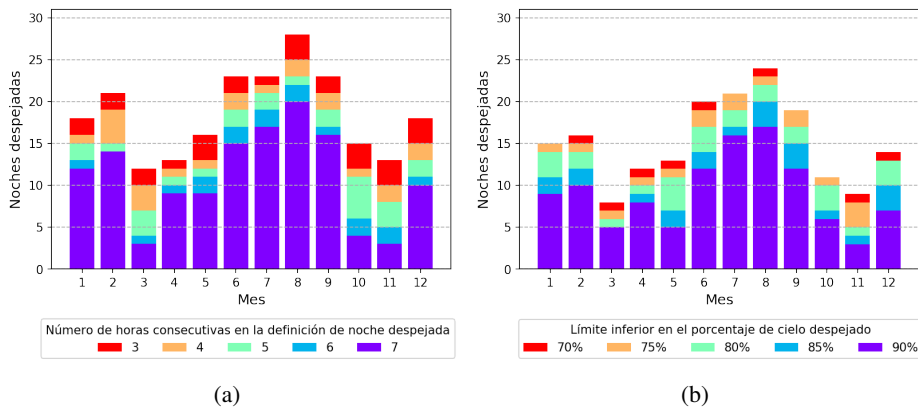


Figura 5.18: Igual que la figura 5.16 pero para la región del Chimborazo.

para la Cocha y la Tota, y 6 noches para Chimborazo; sólo se encontraron dos valores que se alejan mucho de dicho promedio, particularmente en la Tota. Éstos se dieron en febrero, con una diferencia de 10 noches, y en abril con solo una noche de diferencia. Con todo esto, es posible concluir que para estos tres sitios, en el 2018 si bien el porcentaje de nubes presente en una región depende de la época o temporada del año, la diferencia entre la cantidad de noches con más del 70 % del cielo despejado y con más del 90 % no depende de ello.

Capítulo 6

Conclusiones

Se llevó a cabo la identificación de cielos despejados utilizando los resultados del algoritmo ACM del satélite GOES-16, comparándolos con observaciones desde tierra, tomadas por una cámara de cielo completo instalada en la Universidad de Antioquia, sede oriente, ubicada sobre el Valle de San Nicolás, Antioquia, Colombia. Se encontró una precisión del 84 % en la identificación con imágenes satelitales, comparable al 87 %, valor reportado en la literatura (Heidinger, 2011).

Tras hacer la validación, se realizó un estudio del número de noches despejadas durante el año 2018 (definiendo noches despejada como aquella donde por lo menos 5 horas consecutivas estuvieron despejadas) en la región del norte de América de Sur, cubriendo todo Colombia, el norte y centro de Ecuador, oeste de Venezuela y la región amazónica de Perú y Brasil. Se seleccionaron los sitios potenciales para la observación astronómica como aquellos con más de 80 noches despejadas y con alturas de más de 2000 m.s.n.m., descartando así las regiones amazónicas, costeras y demás zonas de baja altitud, limitando la búsqueda a sitios en la cordillera de los andes principalmente. Se encontraron en total 9 sitios que cumplieron estas condiciones en el año estudiado, mostrados en la tabla 5.2. Los primero cuatro de la tabla están localizados en Colombia, los siguientes 3 en Ecuador y el último en Venezuela.

De los 9 seleccionados, los lugares que presentaron mejores resultados fueron aquellos ubicados en los Andes ecuatorianos, comenzando por el Chimborazo, seguido de Imbabura y Tungurahua, con 175, 155 y 153 noches despejadas en el año, respectivamente. Se puede notar además que los dos primeros sitios son también los de mayor altura sobre el nivel del mar, lo que es importante ya que la columna de aire sobre éstos es menor, sugiriendo mejores condiciones para la observación astronómica. Se encontró también que sobre estos 3 sitios la mejor época para este fin fue entre junio y septiembre, siendo agosto el mejor mes.

En cuanto a sitios en Colombia, el mejor resultado se obtuvo para la región alrededor de la Laguna de la Cocha con 135 noches despejadas, seguido del Lago de Tota con 117. Se encontró que los mejores meses para la observación en ese año fueron diciembre, enero y febrero, en la altiplanicie Cundiboyacense, y julio, agosto y diciembre en La Cocha.

En general, los resultados mostrados en este trabajo sugieren que en la búsqueda de sitios potenciales para la observación astronómica en zonas tropicales, en términos de la cantidad de noches despejadas, el fenómeno de principal influencia es el factor orográfico en la formación de nubes, pues al estar en la zona de convergencia intertropical, la forma más plausible de encontrar una región despejada es tras una barrera orográfica. Por esta razón, no es coincidencia que los sitios encontrados en este estudio estén en relieves de gran altura o cerca de ellos.

Finalmente, se insiste en que los resultados obtenidos son particulares para el año 2018. Un estudio que pueda representar mejor el comportamiento de la nubosidad a lo largo del año requiere

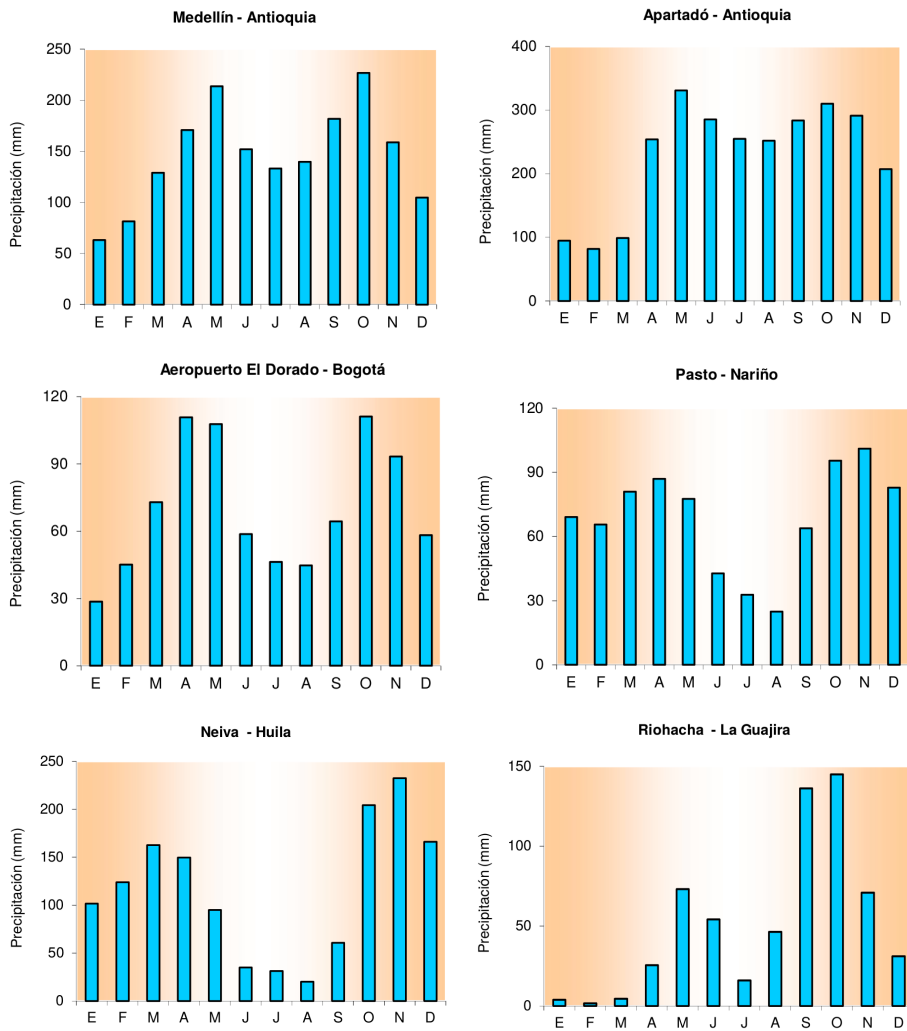
una muestra más amplia de datos satelitales con años completos, información con la que podremos contar posteriormente con las imágenes del satélite GOES-16, pues este comenzó a operar desde el año mencionado.

Apéndice A

Medidas meteorológicas en Colombia

A.1. Gráficos de precipitación anual-mensual

Se muestran los gráficos de precipitación anual-mensual en diferentes lugares de Colombia (promedio por 30 años) tomados del Atlas Climatológico de Colombia de IDEAM (2014).



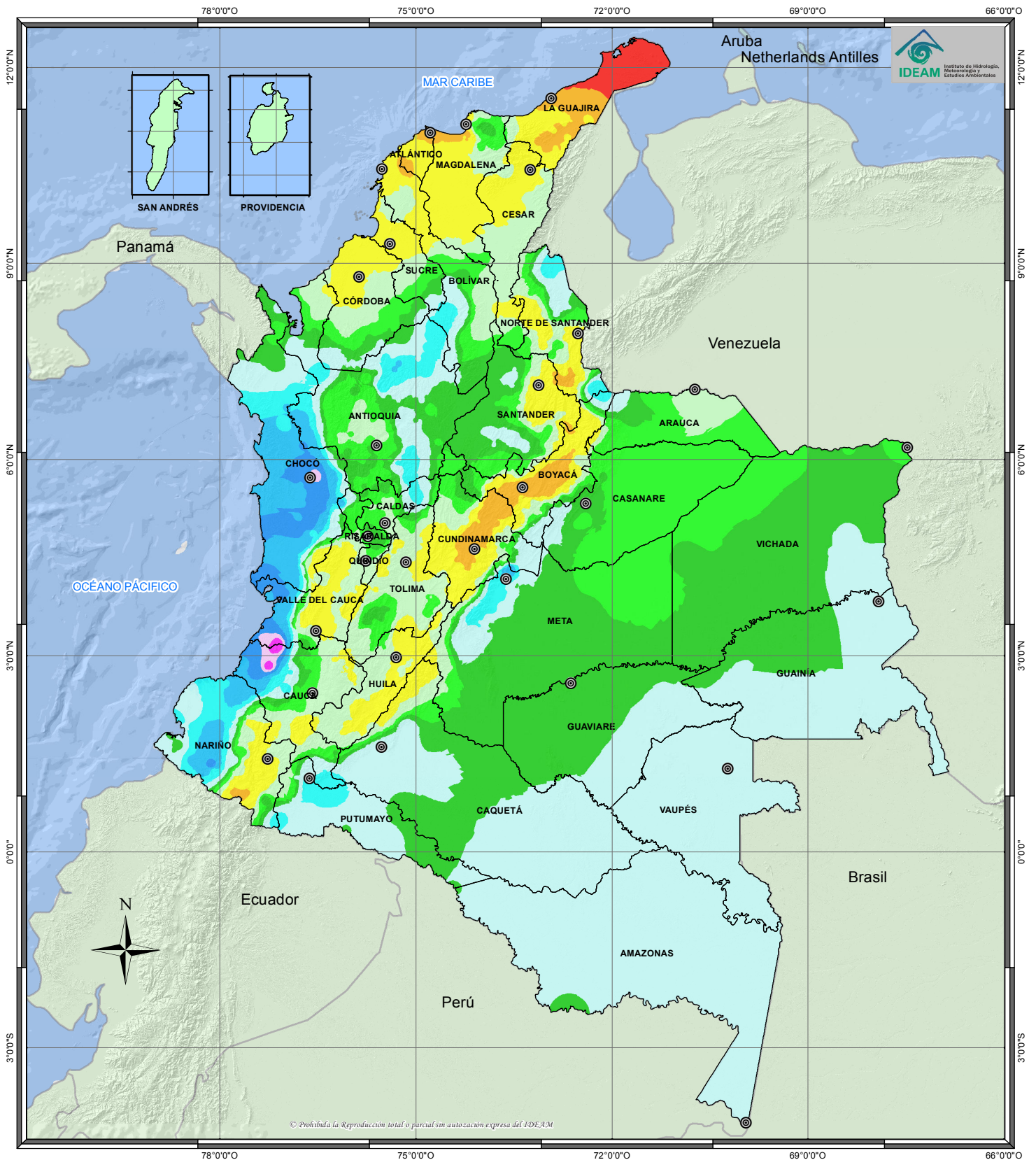
Los gráficos muestran el comportamiento bimodal general de las temporadas de lluvia en Colombia. Resultados muy similares se encuentran en el trabajo de Chaparro Molano et al. (2017), donde también se evidencia dicho comportamiento (ver figuras 7-10 del texto citado).

A.2. Mapas de variables meteorológicas

Los mapas en esta sección muestran el promedio anual (tomado entre 1981 y 2010) de las diferentes variables meteorológicas en Colombia, medidas por el IDEAM a través de estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes sitios del país y publicadas en su Atlas Climatológico de Colombia (IDEAM, 2014). Se introducen en una página individual para conservar la escala.

Se muestran los mapas en el siguiente orden:

- Precipitación.
- Humedad relativa.
- Temperatura media.
- Velocidad del viento a 10 km de altura (no se especifican la fechas de medición).



© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del IDEAM



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

PRECIPITACIÓN MEDIA TOTAL ANUAL. PROMEDIO MULTIANUAL 1981 - 2010.

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda y convenciones

Leyenda (mm)

0 - 500
500 - 1000
1000 - 1500
1500 - 2000
2000 - 2500
2500 - 3000
3000 - 4000
4000 - 5000
5000 - 7000
7000 - 9000
9000 - 11000
> 11000

- Convenciones**
- ⊙ Ciudades Principales
- Límites**
- ~ Límite Departamental
 - ~ Límite Internacional
 - ~ Límite Marítimo

L o c a l i z a c i ó n

Información de Referencia

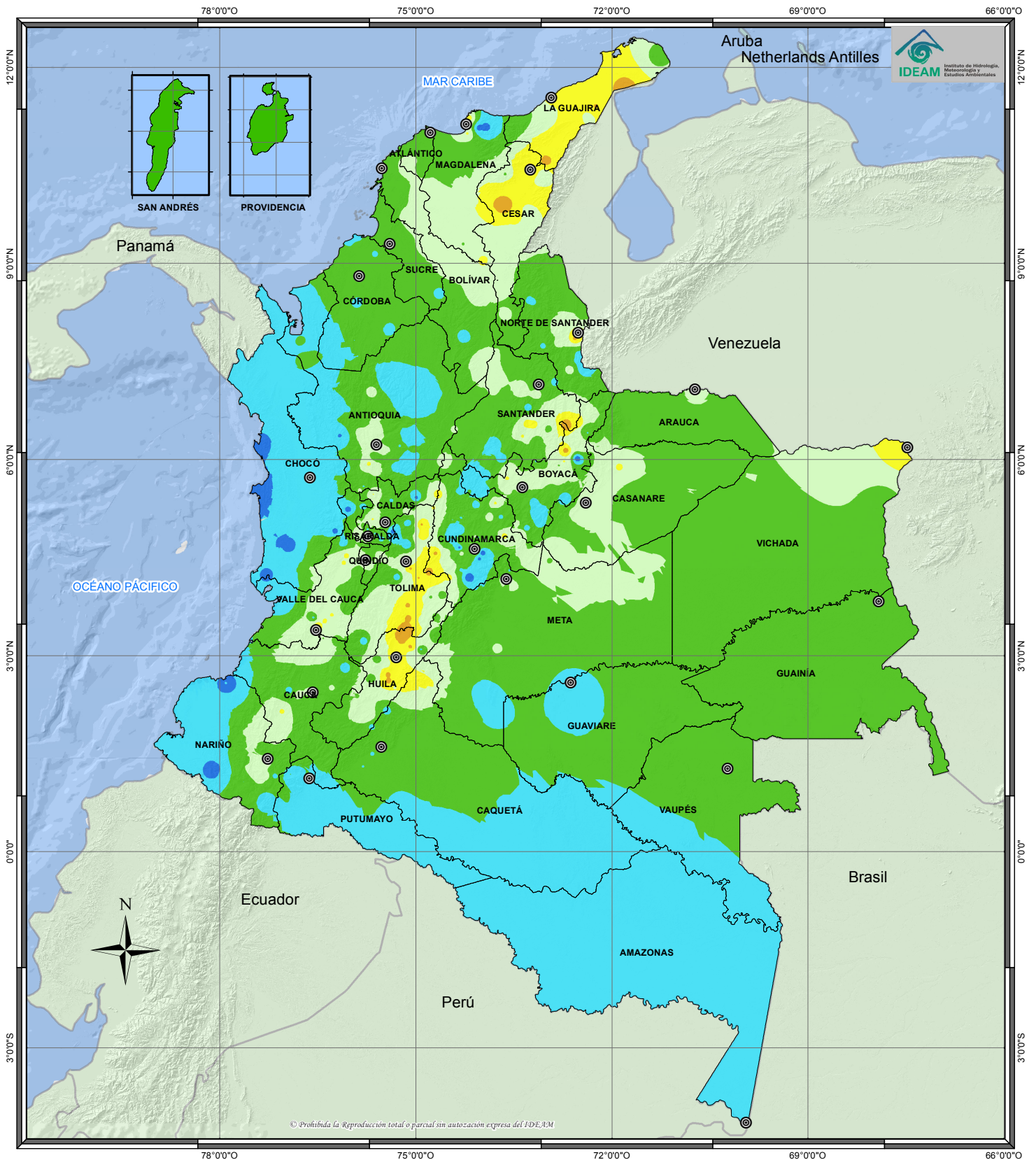
PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1000.000 metros Norte 1000.000 metros Este

Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: William Leonardo Peraza Herrera
Ing. Ambiental

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del IDEAM



© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del IDEAM

IDEAM
 Instituto de Hidrología,
 Meteorología y Estudios Ambientales

MAPA DE HUMEDAD RELATIVA ANUAL PROMEDIO MULTIANUAL (1981 - 2010)

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda y convenciones

Leyenda (%)

65 - 70
70 - 75
75 - 80
80 - 85
85 - 90
90 - 95

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

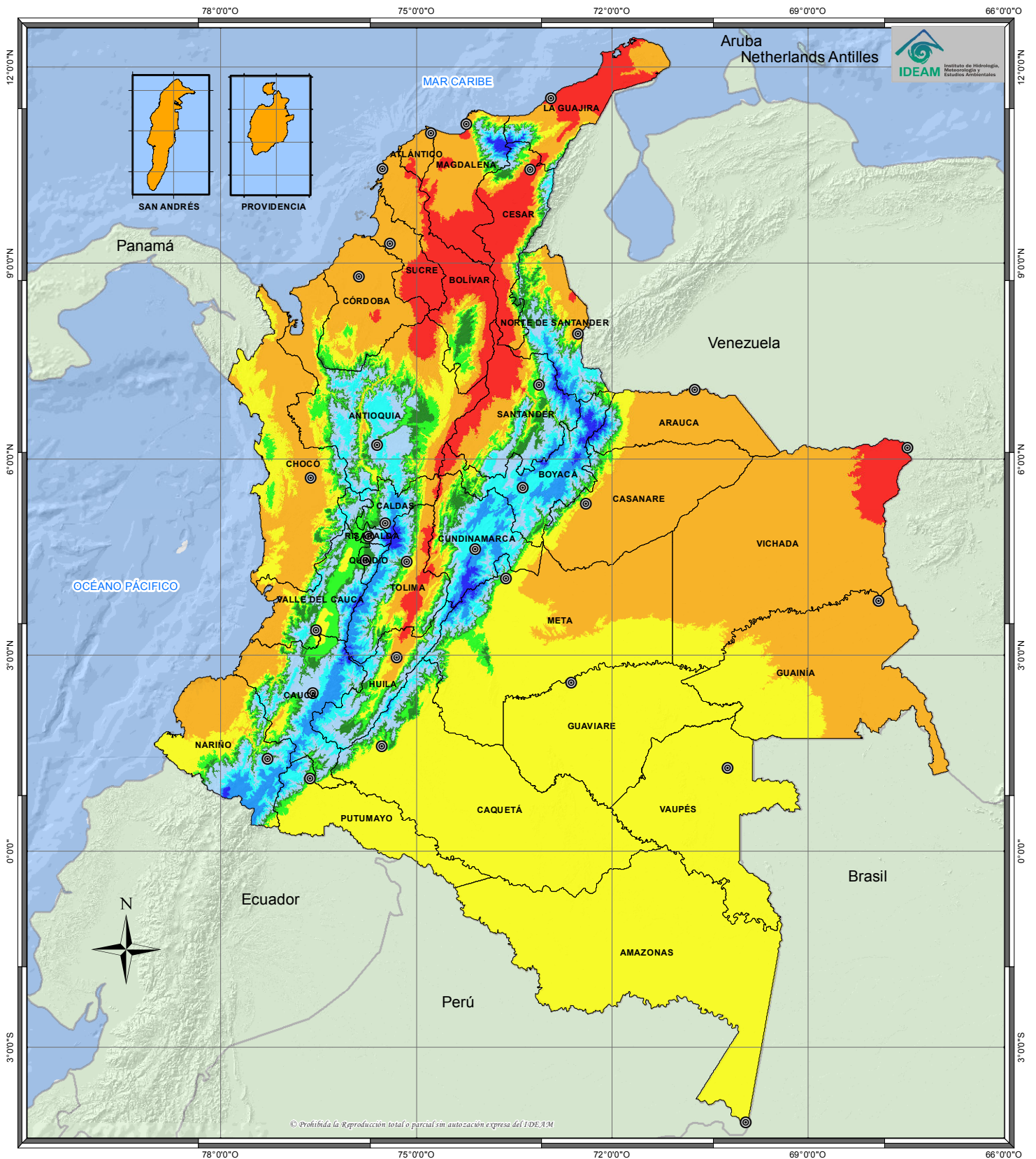
- ~ Límite Departamental
- ~ Límite Internacional
- ~ Límite Marítimo

L o c a l i z a c i o n

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat. Norte 77° 04' 39.0285" Long. Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este
Escala Colombia:	1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia:	1:600.000
Fuente:	Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología - IDEAM Cartografía Básica IGAC
Elaborado Por:	William Leonardo Peraza Herrera Ing. Ambiental

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del IDEAM



IDEAM
 Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C). PROMEDIO MULTIANUAL 1981 - 2010.

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Legenda (°C)

- < 8
- 8 - 12
- 12 - 16
- 16 - 20
- 20 - 22
- 22 - 24
- 24 - 26
- 26 - 28
- > 28

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- ~ Límite Departamental
- ~ Límite Internacional
- ~ Límite Marítimo

Información de Referencia

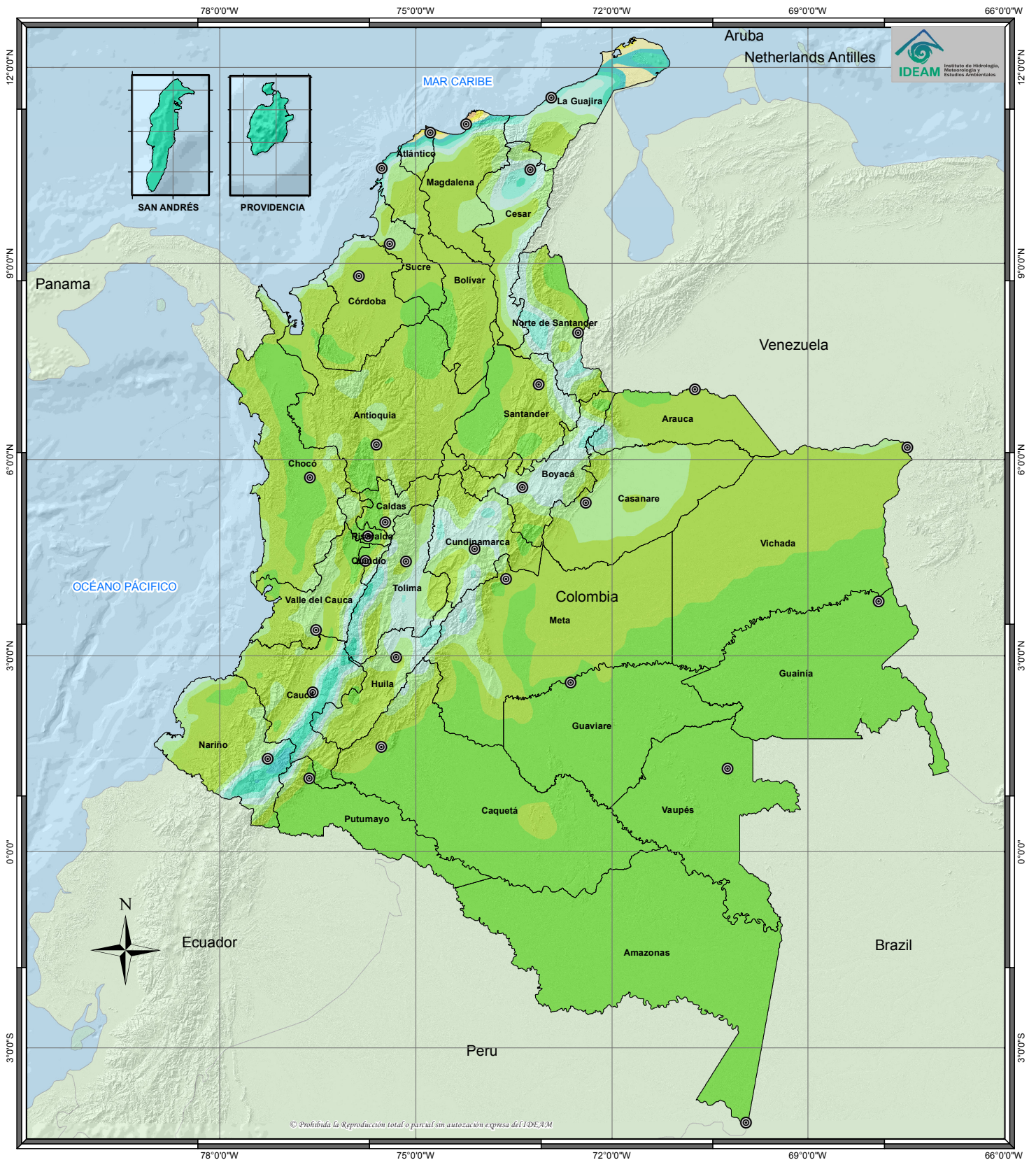
PROYECCIÓN: Conforme de Gauss
 DATUM: MAGNA - SIRGAS
 ORIGEN DE LA ZONA: BOGOTÁ
 COORDENADAS GEOGRÁFICAS: 4° 35' 46.3215" Lat. Norte
 77° 04' 39.0285" Long. Oeste
 COORDENADAS PLANAS: 1'000.000 metros Norte
 1'000.000 metros Este

Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología - IDEAM
 Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: William Leonardo Peraza Herrera
 Ing. Ambiental

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del IDEAM



© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del IDEAM

IDEAM
 INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA
 Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

**VELOCIDAD DEL VIENTO
 A 10 METROS DE ALTURA
 (m/s)**

ANUAL

**REPÚBLICA DE COLOMBIA
 2015**

Legenda

< 2	8 - 9
2 - 3	9 - 10
3 - 4	10 - 11
4 - 5	11 - 12
5 - 6	12 - 13
6 - 7	> 13
7 - 8	

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- ~ Límite Departamental
- ~ Límite Internacional
- ~ Límite Marítimo

Información de Referencia

PROYECCIÓN: Conforme de Gauss
 DATUM: MAGNA - SIRGAS
 ORIGEN DE LA ZONA: BOGOTÁ
 COORDENADAS GEOGRÁFICAS: 4° 35' 46.3215" Lat.Norte
 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
 COORDENADAS PLANAS: 1'000.000 metros Norte
 1'000.000 metros Este

Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
 Subdirección de Meteorología - IDEAM
 Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Julieta Serna Cuenca
 Geografía MSc; Meteorología

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del IDEAM

Apéndice B

Uso de Python en la lectura de imágenes de GOES-16

Se muestra a continuación un programa escrito en Python que muestra de forma rápida cómo se hace la lectura de una imagen de GOES-16, particularmente de la máscara ACM. Se añade también una muestra de cómo se puede seleccionar en la imagen una región determinada.

B.1. Cargar datos de una imagen

```
In [1]: # Librerías necesarias

from netCDF4 import Dataset # Para leer los datos en el formato NetCDF
import pandas as pd # Útil para manipular datos de tiempo, etc.

In [2]: im = 'OR_ABI-L2-ACMF-M3_G16_s20190010000364_e20190010011131_c20190010011303.nc'

In [3]: # Podemos extraer la fecha y hora del nombre de la imagen

b_time = im[23:34]
year = int(b_time[:4])
day = (pd.to_datetime('%d-01-01'%year) +
       pd.to_timedelta(int(b_time[4:7])-1,unit='d'))
hour = int(b_time[7:9])
minuts = int(b_time[-2:])
ffhh = day+pd.to_timedelta(hour,unit='h')+pd.to_timedelta(minuts,unit='m')

print('Fecha y hora:')
print(ffhh)

Fecha y hora:
2019-01-01 00:00:00
```



```
In [4]: # Leo la imagen
```

```
dataset = Dataset(im)
dataset.variables.keys()
```

```
Out[4]: odict_keys(['BCM', 'DQF', 't', 'y', 'x', 'time_bounds', 'goes_imager_projection', 'y_image',
'y_image_bounds', 'x_image', 'x_image_bounds', 'nominal_satellite_subpoint_lat', 'nominal_satellite_subpoint_lon', 'nominal_satellite_height', 'geospatial_lat_lon_extent', 'total_number_of_cloud_mask_points', 'number_of_clear_pixels', 'number_of_probably_clear_pixels', 'number_of_probably_cloudy_pixels', 'number_of_cloudy_pixels', 'percent_clear_pixels', 'percent_probably_clear_pixels', 'percent_probably_cloudy_pixels', 'percent_cloudy_pixels', 'percent_reminator_pixels', 'min_obs_modeled_diff_RTM_BT_comparison_bands_all_sky', 'max_obs_modeled_diff_RTM_BT_comparison_bands_all_sky', 'mean_obs_modeled_diff_RTM_BT_comparison_bands_all_sky', 'std_dev_obs_modeled_diff_RTM_BT_comparison_bands_all_sky', 'min_obs_modeled_diff_RTM_BT_comparison_bands_clear_sky', 'max_obs_modeled_diff_RTM_BT_comparison_bands_clear_sky', 'mean_obs_modeled_diff_RTM_BT_comparison_bands_clear_sky', 'std_dev_obs_modeled_diff_RTM_BT_comparison_bands_clear_sky', 'algorithm_dynamic_input_data_container', 'processing_parm_version_container', 'algorithm_product_version_container', 'retrieval_local_zenith_angle', 'quantitative_local_zenith_angle', 'retrieval_local_zenith_angle_bounds', 'quantitative_local_zenith_angle_bounds', 'retrieval_solar_zenith_angle', 'twilight_solar_zenith_angle', 'retrieval_solar_zenith_angle_bounds', 'twilight_solar_zenith_angle_bounds', 'RTM_BT_comparison_wavelengths', 'RTM_BT_comparison_band_ids', 'percent_uncorrectable_GRB_errors', 'percent_uncorrectable_L0_errors'])
```

```
In [5]: # Información de los datos de la máscara
```

```
dataset.variables['BCM']
```

```
Out[5]: <class 'netCDF4._netCDF4.Variable'>
int8 BCM(y, x)
  FillValue: -1
  long_name: ABI L2+ Clear Sky Mask
  standard_name: cloud_binary_mask
  _Unsigned: true
  valid_range: [0 1]
  units: 1
  resolution: y: 0.000056 rad x: 0.000056 rad
  coordinates: retrieval_local_zenith_angle quantitative_local_zenith_angle retrieval_solar_zenith_angle t y x
  grid_mapping: goes_imager_projection
  cell_methods: retrieval_local_zenith_angle: point (good or degraded quality pixel produced) quantitative_local_zenith_angle: point (good quality pixel produced) retrieval_solar_zenith_angle: point (good quality pixel produced) t: point area: point
  flag_values: [0 1]
  flag_meanings: clear_or_probably_clear cloudy_or_probably_cloudy
  ancillary_variables: DQF
  clear_pixel_definition: no cloud detected and failed a test for high values of spatial heterogeneity
  probably_clear_pixel_definition: no cloud detected but passed a test for high values of spatial heterogeneity and one or more neighboring pixels identified as cloudy. pixel is possibly cloud-contaminated
  probably_cloudy_pixel_definition: cloud detected but likely contains a cloud edge, since one or more neighboring pixels are clear. pixel is probably cloud-contaminated
  cloudy_pixel_definition: cloud detected and failed a test for cloud edges
  unlimited dimensions:
  current shape = (5424, 5424)
  filling on
```

```
In [6]: # Asigno una variable a los datos de la máscara
```

```
# (note que es una matriz de 5424X5424)
```

```
cs = dataset.variables['BCM'][:]
```

```
In [7]: # Altura de la órbita del satélite
sat_h= dataset.variables['goes_imager_projection'].perspective_point_height

# Longitud de la órbita del satélite
sat_lon = dataset.variables['goes_imager_projection'].longitude_of_projection_origin

# Dirección en que se hace el barrido
sat_sweep = dataset.variables['goes_imager_projection'].sweep_angle_axis

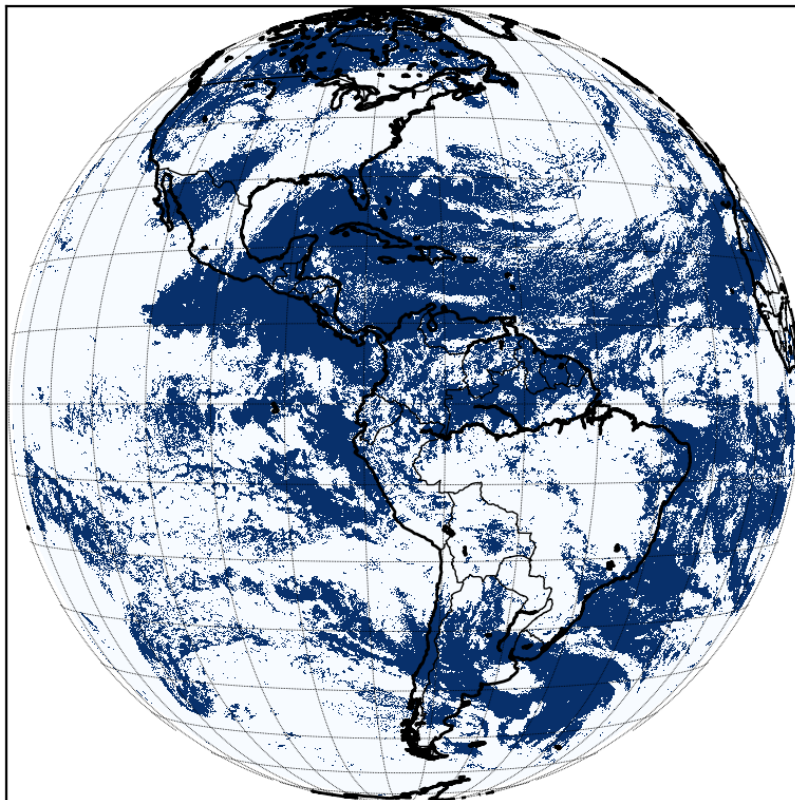
# Leo las coordenadas del satélite.
# Son generadas con una proyección geo-estacionaria

X = dataset.variables['x'][:]
Y = dataset.variables['y'][:]
```

B.2. Visualización

```
In [8]: import matplotlib.pyplot as plt # Se utiliza para crear y manipular figuras
# Con esta herramienta se elaboran los mapas:
from mpl_toolkits.basemap import Basemap
import numpy as np # Util para manipular arreglos
```

```
In [9]: fig = plt.figure(figsize=(5,5),dpi=200)
# Este es el mapa.
# Note que se multiplican las coordenadas por la altura del satélite
m = Basemap(resolution='l', projection='geos', lon_0=sat_lon,
            llcrnrx=X.min()*sat_h, llcrnry=Y.min()*sat_h,
            urcrnrx=X.max()*sat_h, urcrnry=Y.max()*sat_h)
im = m.imshow(cs,cmap='Blues_r',origin='upper')
m.drawcountries()
m.drawcoastlines()
m.drawparallels(np.arange(-90.0, 90.0, 10.0), linewidth=0.3, color='black')
m.drawmeridians(np.arange(0.0, 360.0, 10.0), linewidth=0.3, color='black')
plt.show()
```



B.3. Seleccionar una región dadas sus coordenadas

```
In [10]: # Se utiliza para realizar proyecciones entre tipos de coordenadas
from pyproj import Proj

In [11]: # Creamos un objeto (función) que nos permite hacer proyecciones dados
# los parámetros de la órbita del satélite
p = Proj(proj='geos', h=sat_h, lon_0=sat_lon, sweep=sat_sweep)

In [12]: # Esquina inferior izquierda del "recuadro" que queremos estudiar
xmin,ymin = p(-90,-15)/sat_h
# Esquina superior derecha
xmax,ymax = p(-60,15)/sat_h

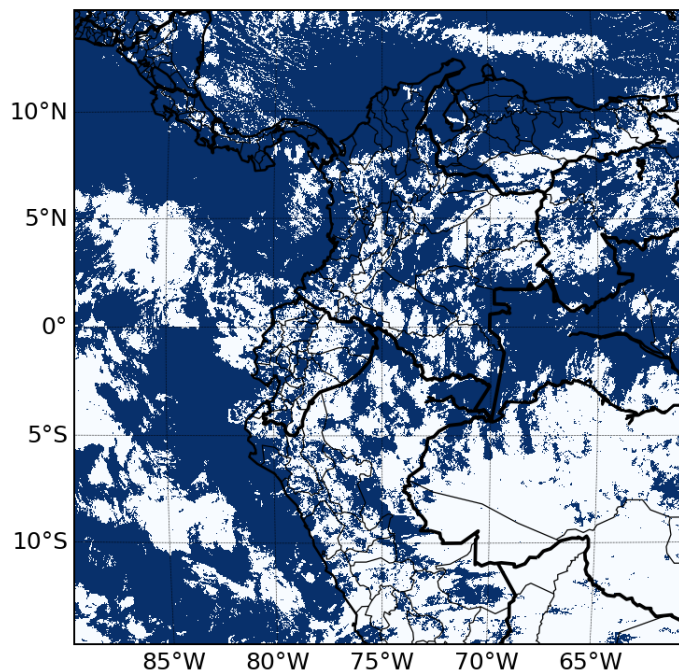
sel_x = np.where((X>=xmin) & (X<=xmax))
sel_y = np.where((Y>=ymin) & (Y<=ymax))
x_col = X[sel_x]
y_col = Y[sel_y]
print('Tamaño de la imagen "recortada":',len(y_col),'X',len(x_col))

Tamaño de la imagen "recortada": 1616 X 1570

In [13]: # Asignamos los datos de la imagen recortada a una nueva variable
cs_cut= cs[sel_y[0].min():sel_y[0].max()+1,sel_x[0].min():sel_x[0].max()+1]
```

B.3.1. Visualización de la región seleccionada

```
In [14]: fig = plt.figure(figsize=(5,5),dpi=180)
m = Basemap(resolution='l', projection='geos', lon_0=sat_lon,
            llcrnrx=x_col.min()*sat_h, llcrnry=y_col.min()*sat_h,
            urcrnrx=x_col.max()*sat_h, urcrnry=y_col.max()*sat_h)
im = m.imshow(cs_cut,origin='upper', cmap='Blues_r')
m.drawcoastlines()
m.drawcountries(linewidth=1.5)
m.drawstates()
m.drawparallels(np.arange(-10,15,5),linewidth=0.3,
                color='black',labels=[True,False,False,True])
m.drawmeridians(np.arange(-85,-60,5),linewidth=0.3,
                color='black',labels=[True,False,False,True])
plt.show()
plt.close()
```



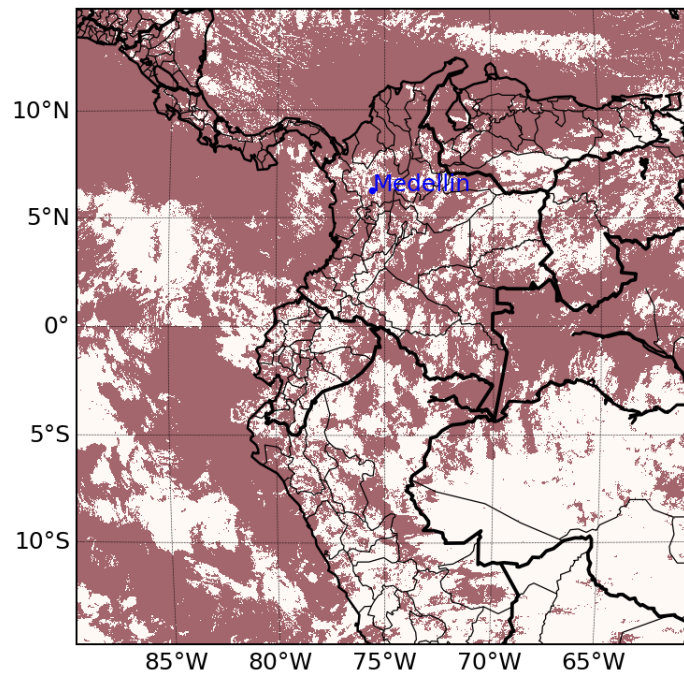
```
In [15]: # Podemos, por ejemplo, cambiar la paleta de colores
# y marcar un punto sobre el mapa:

fig = plt.figure(figsize=(5,5),dpi=180)
m = Basemap(resolution='l', projection='geos', lon_0=sat_lon,
            llcrnrx=x_col.min()*sat_h, llcrnry=y_col.min()*sat_h,
            urcrnrx=x_col.max()*sat_h, urcrnry=y_col.max()*sat_h)
im = m.imshow(cs_cut,origin='upper', cmap='Reds_r', alpha=0.6)
m.drawcoastlines()
m.drawcountries(linewidth=1.5)
m.drawstates()
m.drawparallels(np.arange(-10,15,5),linewidth=0.3,
                color='black', labels=[True,False,False,True])
m.drawmeridians(np.arange(-85,-60,5),linewidth=0.3,
                color='black', labels=[True,False,False,True])

lat = 6.244747 # latitud
lon = -75.574828 # longitud

x,y=m(lon,lat)
m.plot(x,y,'bo',markersize=2)
plt.text(x,y,'Medellin',fontsize=10,color='blue')

plt.show()
plt.close()
```



B.3.2. Selección de puntos con coordenadas específicas

```
In [16]: # Para pasar de cualquier coordenadas en lon-lat
# a las coordenadas proyectadas
```

```
p(lon,lat)/sat_h
```

```
Out[16]: array([-0.00177533,  0.01923531])
```

```
In [17]: # Tambien se puede hacer en la otra dirección
# (siempre multiplicando por la altura)

xm = -0.00177533 * sat_h
ym = 0.01923531 * sat_h

p(xm,ym,inverse=True)
```

```
Out[17]: (-75.57482642552435, 6.244748380884747)
```

```
In [18]: # Y para conocer las coordenadas del pixel más cercano

def find_nearest(array, value):
    array = np.asarray(array)
    idx = (np.abs(array - value)).argmin()
    return array[idx]
```

```
In [19]: xc = find_nearest(X,xm/sat_h)*sat_h
yc = find_nearest(Y,ym/sat_h)*sat_h

print(p(xc,yc,inverse=True))

(-75.5711578588535, 6.244972555761528)
```

Bibliografía

- Andrews, D. G. (2010). *An Introduction to Atmospheric Physics*. Cambridge University Press, New York, USA, 2 edition.
- Banco de Occidente. (2004). *Altiplanos de Colombia*. Editorial Banco de Occidente, Cali, Colombia.
- Brieva, E. (1985). Search for a Site for an Astrophysical Station in Columbia - Preliminary Results. *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 10:397.
- Camacho, T. A. (2013). La cocha o lago guamués. Recuperado de: <https://nariño.gov.co>.
- Cavazzani, S., Ortolani, S., & Zitelli, V. (2012). Site testing at astronomical sites: evaluation of seeing using satellite-based data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419:3081–3091.
- Cavazzani, S., Ortolani, S., Zitelli, V., & Maruccia, Y. (2011). Fraction of clear skies above astronomical sites: a new analysis from the GOES12 satellite. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411:1271–1283.
- Chaparro Molano, G., Ramírez Suárez, O. L., Restrepo Gaitán, O. A., & Marcial Martínez Mercado, A. (2017). Low Dimensional Embedding of Climate Data for Radio Astronomical Site Testing in the Colombian Andes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129(10):105002.
- Cherubini, T., Businger, S., Lyman, R., & Chun, M. (2008). Modeling Optical Turbulence and Seeing over Mauna Kea*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47:1140.
- CIDA. (2019). Centro de Investigaciones de Astronomía. Observatorio Astronómico Nacional (OAN). Recuperado de: <http://www.cida.gob.ve>.
- Dravins, D., Lindegren, L., Mezey, E., & Young, A. T. (1997). Atmospheric Intensity Scintillation of Stars. I. Statistical Distributions and Temporal Properties. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 109:173–207.
- Durán, D. M. & Suarez, D. C. (2011). *Perfil ambiental de la subcuenca del río Neusa*. Tesis de grado. Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.
- Erasmus, D. & Sarazin, M. (2002). Utilizing satellite data for evaluation and forecasting applications at astronomical sites. In Vernin, J., Benkhaldoun, Z., & Muñoz-Tuñón, C., editors, *Astronomical Site Evaluation in the Visible and Radio Range*, volume 266 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 310.

- Gacal, G. F. B., Antioquia, C., & Lagrosas, N. (2018). Trends of night-time hourly cloud-cover values over manila observatory: ground-based remote-sensing observations using a digital camera for 13 months. *International Journal of Remote Sensing*, 39(21):7628–7642.
- Heidinger, A. (2011). Algorithm theoretical basis documents: ABI Cloud Mask. *NOAA NESDIS center for satellite applications and research*.
- Hidayat, T., Mahasena, P., Dermawan, B., Hadi, T. W., Premadi, P. W., & Herdiwijaya, D. (2012). Clear sky fraction above Indonesia: an analysis for astronomical site selection. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427:1903–1917.
- Houze Jr., R. A. (2012). Orographic effects on precipitating clouds. *Reviews of Geophysics*, 50(1).
- IDEAM (2014). Atlas climatológico. Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM (2018). Sierra nevada de santa marta. Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co>.
- Instituto Geofísico-EPN (2019). Red de observatorios vulcanologicos (ROVIG). Recuperado de: <https://www.igepon.edu.ec>.
- Lombardi, G., Navarrete, J., & Sarazin, M. (2014). Review on atmospheric turbulence monitoring. In *Adaptive Optics Systems IV*, volume 9148 of Proc. SPIE, page 91481W.
- Marquet, P. A., Bozinovic, F., Bradshaw, G., Cornelius, C., Gonzalez, H., Gutierrez, J. R., Hajek, E. R., Lagos, J. A., Lopez-Cortés, F., Nuñez, L., Rosello, E. F., Santoro, C., Samaniego, H., Standen, V. G., Torres-Mura, J. C., & Jaksic, F. M. (1998). Los ecosistemas del desierto de atacama y área andina adyacente en el norte de chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 71:593–617.
- Meech, K. J. (2015). The atmosphere and observing – a guide to astronomical seeing. <http://www.ifa.hawaii.edu/~meech/a281/handouts/seeing.pdf>. Accedido: 2017-12-10.
- Mesa, O. J., Poveda, G., & Carvajal, L. F. (1997). *Introducción al clima de Colombia*. Publicación ... de la Institución "Fernando el Católico". Universidad Nacional de Colombia.
- NOAA-NASA (2018). Geostationary Operational Environmental Satellite — R Series. <https://www.goes-r.gov/>. Accedido: 2018-10-19.
- Nuñez, L., Triana, J. V., Verdugo, N., Sopò, G., & Martinez, O. (2014). Informe batimetría Lago de Tota. *Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)*.
- Pabón, J. D., Zea, J., León, G., Hurtado, G., González, O. C., & Édgar Montealegre, J. (2001). *El medio ambiente en Colombia: La atmósfera, el tiempo y el clima*. Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, Colombia, 2 edition.
- Pinzón, G., González, D., & Hernández, J. (2015). Identification of Potential Sites for Astronomical Observations in Northern South America. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127:523.
- Reiger, S. H. (1963). Starlight scintillation and atmospheric turbulence. *The Astronomical Journal*, 68:395.

BIBLIOGRAFÍA

Santos, E. (2000). *Fúquene el lecho de la zorra*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR.

Tokovinin, A., Kornilov, V., Shatsky, N., & Voziakova, O. (2003). Restoration of turbulence profile from scintillation indices. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 343:891–899.

Weinreb, M. & Han, D. (2011). Conversion of GVAR Infrared Data to Scene Radiance or Temperature. *NOAA memorandum*.

Wikipedia (2019). Embalse del tominé. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org>.

World Meteorological Organization (2017). *International Cloud Atlas: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*. WMO, 407 edition.