

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES RADIATIVAS DE LAS NUBES Y
SU ENFLUENCIA EN EL BALANCE DE MASA DE UN GLACIAR DE
LA REGIÓN TROPICAL INTERNA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
AMBIENTAL**

CRISTINA GUADALUPE ARGOTI ARCOS
tinargoti_91@outlook.com
cristina.argoti@epn.edu.ec

DIRECTOR: LUIS MAISINCHO GUAGRILLA, PhD.
luis.maisincho@ikiam.edu.ec

CODIRECTOR: MARCOS VILLACÍS ERAZO, PhD.
marcos.villacis@epn.edu.ec

Quito, junio 2018

DECLARACIÓN

Yo, Cristina Guadalupe Argoti Arcos, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Cristina Guadalupe Argoti Arcos

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Cristina Guadalupe Argoti Arcos, bajo nuestra supervisión.

Luis Maisincho Guagrilla, PhD.

Marcos Villacís Erazo, PhD.

AGRADECIMIENTOS

Me permito agradecer a todas las personas que estuvieron a mi lado, apoyándome en cada actividad académica durante los años en la universidad (por cierto, son muchos), gracias a mis padres, hermanos y amigos.

Quiero agradecer a mi director de tesis el Dr. Luis Maisincho, por compartirme su conocimiento, tiempo y en especial su paciencia. De igual manera, a mi codirector, el Dr. Marcos Villacís por permitirme conocer esta rama de la ciencia y la investigación, por sus conocimientos y los momentos de amistad que pudimos compartir. Un agradecimiento especial al investigador francés, el Dr. Jean Emmanuel Sicart por explicarme los procedimientos adecuados para la realización de este trabajo, gracias por el tiempo, preocupación y seguimiento a este estudio.

Agradezco a mis amigos por hacer de esta etapa universitaria la mejor, creo tener al menos una anécdota por contar con cada uno de ellos, gracias por ser parte de los logros, pero en especial gracias por las ser parte de las actividades fuera de la universidad. De igual manera quiero agradecer a mis amigos del pedal, gracias por las rutas rodadas, consejos y enseñanzas, gracias por siempre estar a mi lado cuando más lo necesité. A mis amigos Sebas y Marco que, a pesar de la distancia, siempre están pendientes de mí. Finalmente agradezco a Pao, Jean y Marlon por todo el “bullying” compartido, hacen que mis días sean mejor.

DEDICATORIA

A la memoria de mi abuelo Miguel

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XII
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS.....	XIII
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
PRESENTACIÓN	XVIII
CAPÍTULO 1	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	2
1.2.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	3
1.2.3 JUSTIFICACIÓN METODOLOGÓGICA	4
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
CAPÍTULO 2	6
ZONA DE ESTUDIO Y CLIMA	6
2.1 VOLCÁN ANTISANA.....	6
2.1.1 GLACIAR 15	7

2.1.2 GLACIAR 12	7
2.2 LA ZONA TROPICAL ANDINA	8
2.2.1 La zona tropical interna y externa	9
2.2 CLIMATOLOGÍA	9
CAPÍTULO 3	13
MARCO TEÓRICO.....	13
3.1 EL BALANCE DE ENERGÍA SUPERFICIAL (BES).....	13
3.1.1 LA CAPA LÍMITE SUPERFICIAL	13
3.1.2 EL BALANCE DE ENERGIA	13
3.1.3 RADIACIÓN NETA.....	15
3.1.4 FLUJOS TURBULENTOS	17
3.2 BALANCE DE MASA (BM).....	18
3.3 LA OSILACIÓN DEL SUR	21
3.3.1 EL NIÑO – OSCILACIÓN DEL SUR	21
3.3.2 LA NIÑA	22
3.3.3 ÍNDICE MEI.....	22
3.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN.....	23
3.4.1 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (R).....	24
3.4.2 COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R ²).....	24
3.5 ESTADO DEL ARTE	24
3.5.1 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES RADIATIVAS DE LAS NUBES DE SICART (2015).....	24
3.5.2 ESTUDIO DE LA RADIACIÓN DE ONDA LARGA EN LOS GLACIARES TROPICALES ANDINOS DE SICART (2010).....	26
CAPÍTULO 4	27
DATOS Y MÉTODO.....	27
4.1 DATOS.....	27
4.1.1 DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN	29
4.1.2 DATOS METEOROLÓGICOS	29
4.1.3 DATOS DE CAUDALES.....	31

4.2 MÉTODO	33
4.2.1 RADIACIÓN EN CIELO DESPEJADO	33
4.2.2 ÍNDICES DE LAS PROPIEDADES RADIATIVAS DE LAS NUBES	35
CAPÍTULO 5	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
5.1 RESULTADOS.....	38
5.1.1 EFECTO DE LAS NUBES SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR.....	38
5.1.2 PARAMETRIZACIÓN DE LAS RADIACIONES EN CIELO DESPEJADO.....	38
5.1.3 ÍNDICES RADIATIVOS	41
5.2 DISCUSIÓN	47
5.2.1 EFECTO DE LAS NUBES EN LA RADIACIÓN INCIDENTE	47
5.2.2 EFECTO DE LAS NUBES EN LA FUSIÓN DEL GLACIAR	49
5.2.3 EFECTO DE LAS NUBES EN EL BALANCE DE MASA.....	54
5.2.4 EFECTO DE LAS NUBES EN EL CAUDAL.....	58
5.2.5 BASE DE DATOS	61
CAPÍTULO 6	63
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	63
6.1 CONCLUSIONES	63
6.2 TRABAJOS FUTUROS	65
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	71
ANEXO 1.....	72
BASE DE DATOS	72
ANEXO 2.....	74
RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR 15 DEL VOLCÁN ANTISANA, PARA CADA	

AÑO DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015).....	74
ANEXO 3.....	86
PORCENTAJE DE FUSIÓN MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO DESPEJADO ($IN < 0.35$), SEMI CUBIERTO ($0.35 \leq IN < 1.20$) Y NUBLADO ($IN > 1.20$) DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)	86
ANEXO 4.....	91
PORCENTAJE DE CAUDAL MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO DESPEJADO ($IN < 0.35$), SEMI CUBIERTO ($0.35 \leq IN < 1.20$) Y NUBLADO ($IN > 1.20$) DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)	91

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: UBICACIÓN DEL VOLCÁN ANTISANA RESPECTO A LA CIUDAD DE QUITO	6
FIGURA 2.2: UBICACIÓN DELVOLCAN ANTISANA EN LA CORDILLERA ORIENTAL DEL ECUADOR	7
FIGURA 2.3: UBICACIÓN DE LA CUENCAS GLACIAR 15(LÍNEA CELESTE), LOS CRESPOS Y HUMBOLT (LÍNEA AZUL), MONITOREADAS EN LA ZONA OCCIDENTAL DEL VOLCÁN ANTISANA.....	8
FIGURA 2.4: ZONA TROPICAL INTERNA Y EXTERNA	9
FIGURA 2.5: ESQUEMA DEL MOVIMIENTO DE HUMEDAD HACIA LOS ANDES DESDE EL ATLÁNTICO	10
FIGURA 2.6: PROMEDIOS DIARIOS DE RADIACIÓN DE ONDA CORTA Y LARGA, TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y VELOCIDAD DEL VIENTO A 4850 M DE ALTITUD, EN EL GALICAR 15 DEL VOLCÁN ANTISANA, ENTRE 1 DE ENERO DE 2014 Y 31 DE DICIEMBRE DE 2015. LA LÍNEA NEGRA PERTENECE A LA MEDIA MÓVIL DE 15 DÍAS.	11
FIGURA 3.1: FLUJOS DE ENERGÍA QUE INTERVIENEN EL BALANCE DE ENERGÍA SUPERFICIAL, LAS TRASFERENCIAS DE ENERGÍA SE INDICAN CON FLECHAS	14
FIGURA 3.2: DIAGRAMA DE LA VARIACIÓN DE LA ALTURA DE NIEVE Y HIELO EN UN PERIODO DE TIEMPO DETERMINADO.....	19
FIGURA 3.3: TESTIGO DE HIELO/NIEVE EN LA CUAL PUEDE IDENTIFICARSE LA CAPA BASAL	20
FIGURA 3.4: ÍNDICE MULTIVARIABLE ENSO, MEI POR SUS SIGLAS EN INGLES.....	23
FIGURA 4.1: UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA ORE Y ESTACIÓN LIMNIGRÁFICA LOS CRESPOS.....	28
FIGURA 4.2: DATOS DISPONIBLES EN EL PRERIEDO DE ESTUDIO (2005-2015).....	29
FIGURA 4.3: VERTEDERO TRAPEZOIDAL LOS CRESPOS A 4521 M.S.N.M..	31

FIGURA 4.4: CURVA DE DESCARGA LOS CRESPOS.....	32
FIGURA 5.1: RADIACIÓN SOLAR: EXTRATERRESTRE EN CIELO DESPEJADO E INCIDENTE MEDIDA POR LA AWS-ORE, PARA EL AÑO 2010.....	40
FIGURA 5.2: RADIACIÓN ATMOSFÉRICA INCIDENTE MEDIDA Y RADIACIÓN TEÓRICA EN CIELO DESPEJADO PARA EL AÑO 2010.	41
FIGURA 5.3: EMISIVIDAD VS TRANSMISIVIDAD, A PARTIR DE VALORES DIARIOS DEL PERIODO 2005-2015.....	42
FIGURA 5.4: FACTOR DE EMISIÓN INFRARROJA DE LAS NUBES (F) Y FACTOR DE TRANSMISIVIDAD (TN), AÑO 2010.	43
FIGURA 5.5: PROMEDIO MENSUAL DE NÚMERO DE DÍAS DESPEJADOS ($F < 1.15$) PARA EL PERIODO 2005-2015.....	44
FIGURA 5.6: RELACIÓN ENTRE F Y TN POR ÉPOCAS, PARA EL PERIODO 2005-2015.....	45
FIGURA 5.7: HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE F PARA CADA ÉPOCA MA (N=527) Y JAS (N=721) PARA EL PERIODO 2005-2015.....	46
FIGURA 5.8: FORZAMIENTO RADIATIVO CF, PARA EL AÑO 2010.....	47
FIGURA 5.9: PROMEDIOS MENSUALES DE SWINC Y LWATM PARA CADA AÑO DEL PERÍODO DE ESTUDIO (2005-2015).....	48
FIGURA 5.10: PROMEDIO MENSUAL DEL ÍNDICE DE NUBOSIDAD Y FUSIÓN ACUMULADA MENSUAL ENTRE 4850 Y 4900 M.S.N.M. DEL GLACIAR ANTISANA PARA EL PERÍODO DE ESTUDIO (2005-2015).....	51
FIGURA 5.11: BALANCE DE MASA MENSUAL (4850-4900 DE ALTITUD) ENTRE ENERO 2005 Y DICIEMBRE 2012 E ÍNDICE DE NUBOSIDAD (PROMEDIO MENSUAL).....	55
FIGURA 5.12: PROMEDIO MENSUAL DEL BALANCE DE MASA PARA EL PERIODO ENERO 2005 – DICIEMBRE 2012.....	55
FIGURA 5.13: BALANCE DE MASA ACUMULADO DE ENERO 2005 A DICIEMBRE 2012, EVENTOS EL NIÑO (EN ROJO) Y EVENTOS LA NIÑA (EN AZUL).....	57
FIGURA 5.14: EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN DEL CAUDAL PROMEDIO E ÍNDICE DE NUBOSIDAD A PASO DE TIEMPO DIARIO, PARA EL AÑO 2005	58

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1: PARÁMETROS FÍSICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO, MEDIDOS POR LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA ORE	28
TABLA 5.1: VALORES CALIBRADOS DE TCLEAR Y C PARA CADA AÑO DEL PERIODO DE ESTUDIO 2005-2015.....	39
TABLA 5.2: PROMEDIOS MENSUALES DE SWINC Y LWATM DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015).....	49
TABLA 5.3: VALORES DIARIOS DE FUSIÓN (MM A.E.) EN UN DÍA DESPEJADO Y UN DÍA NUBLADO PARA CADA ÉPOCA MA Y JAS	52
TABLA 5.4: <i>PORCENTAJES PROMEDIOS DE FUSIÓN EN DÍAS DESPEJADOS, SEMI CUBIERTOS Y NUBLADOS, PARA EL PERÍODO DE ESTUDIO (2005-2015)</i>	54
TABLA 5.5: CORRELACIÓN ENTRE VALORES MENSUALES DE BALANCE DE MASA E ÍNDICE DE NUBOSIDAD PARA CADA AÑO ENTRE 2005 Y 2012	56
TABLA 5.6: RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE PROMEDIOS DIARIOS DEL CAUDAL Y EL ÍNDICE DE NUBOSIDAD, PARA CADA AÑO DEL PERÍODO DE ESTUDIO	59
TABLA 5.7: <i>PORCENTAJES PROMEDIOS DE CAUDAL EN DÍAS DESPEJADOS, SEMI CUBIERTOS Y NUBLADOS, PARA EL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)</i>	60
TABLA 5.8: PROMEDIOS ANUALES DE CAUDAL EN 25 DÍAS DESPEJADOS, 25 DÍAS SEMI CUBIERTOS Y 25 DÍAS NUBLADOS, DESDE 2005 HASTA 2014	61

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

ENSO	El Niño – Oscilación del Sur
BES	Balance de Energía Superficial
ELA	Equilibrium Line Altitude ó Línea de Equilibrio Altitudinal
AAR	Accumulation Area Ratio ó Proporción del Área de Acumulación
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ICOADS	International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set
MEI	Índice Multivariado ENSO
R	Radiación neta
H	Flujos turbulentos de calor sensible
LE	Flujos turbulentos de calor latente
Q_p	Aporte energético de la precipitación
ΔQ_M	Variación de calor latente
ΔQ_S	Variación de calor sensible
I_0	Constante solar
S_{extra}	Radiación de onda corta en el tope de la atmósfera o radiación extraterrestre
SW_{inc}	Radiación de onda corta incidente
SW_{out}	Radiación de onda corta reflejada
LW_{atm}	Radiación de onda larga incidente o proveniente de la atmósfera
LW_{out}	Radiación de onda larga emitida por la superficie

HR	Humedad Relativa
u	Velocidad del viento
T	Temperatura
F	Índice de emisividad
Tn	Índice de transmisividad
IN	índice de nubosidad
CF_{sw}	Forzamiento radiativo de onda corta
CF_{lw}	Forzamiento radiativo de onda larga
CF	Forzamiento radiativo total
Q	Caudal
e	presión de vapor
ε	Emisividad atmosférica
bn	Balance de masa
ρ_0	Densidad relativa del hielo
ρ	Densidad relativa de la nieve
ρ_i	Densidad relativa de la muestra en una altura determinada h_i
Δz	Variación del espesor de hielo
Δy	Variación del espesor de la nieve
α	Albedo
σ	Constante de Stefan- Boltzman
φ	Ángulo de latitud
ω	Ángulo de longitud
δ	Ángulo de declinación solar

β	Pendiente de una superficie dada
A_z	Azimut
W/m^2	Watts por metro cuadrado
$^{\circ}C$	grados Celsius
K	grados Kelvin
μm	micrómetros
m/s	metros por segundo
m^3/s	metros cúbicos por segundo
m.s.n.m.	metros sobre el nivel del mar
mm a.e.	milímetros de agua equivalente
%	porcentaje

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo determinar las propiedades radiativas de las nubes en el Volcán Antisana de la Cordillera Oriental de los Andes, en Ecuador. El estudio se basa en mediciones de la estación meteorológica ORE ubicada en la morrena del glaciar 15 (4850 m), de enero de 2005 a diciembre de 2015. Se realizaron las parametrizaciones de radiación teórica en cielo despejado de acuerdo a las condiciones específicas del glaciar (gran altitud y baja latitud). Se definieron y calcularon los índices de emisión infrarroja de las nubes y la transmisividad de la radiación de radiación solar, las mismas que proporcionan información inherente de las nubes. Los índices de forzamiento radiativo de las nubes de flujo incidente y el forzamiento radiativo de superficie proporcionan información sobre su efecto general, junto con el índice de nubosidad. Distinguimos dos épocas en el año, MA y JAS, con menor y mayor cantidad de días despejados, respectivamente. La radiación solar fue alta durante todo el año y el forzamiento radiativo de onda corta fue muy negativo, con promedios mensuales que variaron de -50 a -225 W/m^2 de la época JAS a la época MA, respectivamente. La existencia de nubes cálidas bajas con alta emisividad de onda larga, que atenúan la radiación de onda corta ocurre cuando el índice de nubosidad es mayor a 1.2 y 1.0, en las épocas MA y JAS, respectivamente.

En términos energéticos (W/m^2), la radiación incidente de onda corta en la época MA es 25% menor que en JAS y la radiación de onda larga proveniente de las nubes es 10% mayor que en JAS. La fusión es mayor en un día despejado, respecto a un día semi cubierto o nublado, pero el porcentaje de fusión para todo el periodo de estudio es mayor en los días semi cubiertos (80,57%), debido a que los días semi cubiertos son más numerosos durante un año (162 días). La influencia de las nubes sobre el balance de masa tiene una buena correlación (mayor a 0.7) cuando existe un evento La Niña y una correlación baja (casi nula) cuando existe un evento EL Niño. Finalmente, la influencia de las nubes sobre los caudales, es baja con valores de coeficiente de correlación de Pearson (R), menores a 0.4.

ABSTRACT

The objective of this study is to determine the radiative properties of the clouds in the Antisana Volcano of the Eastern Cordillera of the Andes, in Ecuador. It is based on measurements of the ORE weather station located at the glacier 15 moraine (4850 m), from January 2005 to December 2015. The parameterizations of theoretical radiation in clear sky were made according to the specific conditions of the glacier (large altitude and low latitude). The infrared emission indices of the clouds and the transmissivity of the solar radiation, which provide inherent cloud information, are defined and calculated. The radiative forcing indices of the incident flow clouds and the surface's radiative forcing provide information on their general effect with the cloudiness index. We distinguish two seasons in the year, MA and JAS, with less days and more days of clear sky, respectively. Solar radiation was high throughout the year and short-wave radiative forcing was very negative, with monthly averages ranging from -50 to -225 W / m^2 from the JAS season to the MA season, respectively. The existence of low warm clouds with high long wave emissivity, which attenuate short wave radiation occurs when the cloud index is higher than 1.2 and 1.0, in the MA and JAS season, respectively.

In energetic terms (W / m^2), short wave incident radiation in the MA season is 25% less than in JAS season and long wave radiation from the clouds is 10% higher than in JAS. The fusion is higher on a clear day, compared to a semi-covered or cloudy day, but the fusion percentage for the entire study period is higher on semi-covered days (80.57%), because the semi-covered days are more numerous during a year (162 days). The influence of the clouds on the mass balance has a good correlation (greater than 0.7) when there is a La Niña event and a low correlation (almost zero) when there is an El Niño event. Finally, the influence of the clouds on the flows is low with values of Pearson correlation coefficient (R), less than 0.4.

PRESENTACIÓN

La variación interanual de los balances de masa glaciológico y energía superficial en el volcán Antisana depende de entre otros factores, de la cobertura de nubes y la precipitación. Por lo tanto, es necesario estudiar las propiedades de las nubes para calcular el índice de nubosidad, índice adimensional que permite discriminar días despejados, semi cubierto y nublados; y su efecto sobre el balance de masa y la energía disponible para la fusión del hielo/nieve.

El presente trabajo está compuesto por 6 capítulos:

El primer capítulo contiene el planteamiento del problema, las justificaciones teórica, práctica, metodológica y los objetivos.

El segundo capítulo muestra la información correspondiente a la ubicación de la zona de estudio (volcán Antisana), el glaciar 15 y su climatología de acuerdo a datos meteorológicos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiaciones de onda corta y larga.

El tercer capítulo trata sobre el marco teórico que contiene la definición de balance de energía, sus componentes y la forma en que se calcula; definición de balance de masa, línea de equilibrio y las fórmulas para su cálculo; la Oscilación del Sur- El Niño (ENSO) y el índice MEI que cuantifica la Oscilación del Sur dependiendo si se trata de un evento El Niño o La Niña.

El cuarto capítulo presenta los datos meteorológicos, glaciológicos y de caudales que se utilizaron, para el estudio en el período que va desde enero de 2005 hasta diciembre de 2015. También contiene la metodología, calibración de radiación de onda corta y larga en cielos despejado, factores de emisividad, transmisividad y coeficiente de forzamiento radiativo de las nubes.

El capítulo cinco contiene los resultados de los factores de emisividad e índice de nubosidad transmisividad. La discusión del efecto de las nubes en sobre el balance de energía, balance de masa y los caudales del volcán Antisana.

Finalmente, el capítulo seis incluye las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros para dar continuidad a este trabajo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la región tropical Andina existen dos zonas con regímenes climáticos contrastados: a) el trópico externo (Bolivia y sur de Perú) marcado por la alternancia de una estación húmeda y otra seca y b) el trópico interno (Colombia, Ecuador y norte de Perú) donde no existe estacionalidad en los regímenes de precipitación y temperatura (Hastenrath, 1991). Las condiciones climáticas de la región tropical andina son afectadas por el cambio climático, en especial por el incremento de la temperatura del aire. Este incremento alcanzó ~ 0.8 °C durante los últimos 60 años en zonas de alta montaña (Vuille et al., 2008), provocando un retroceso acelerado de los glaciares situados en esta zona (Rabatel et al., 2013).

El clima del glaciar Antisana, situado en el trópico interno es perturbado por la influencia del evento océano-atmosférico ENSO¹, este evento presenta su fase cálida y fría, llamados El Niño y La Niña respectivamente. Los efectos del ENSO sobre el Antisana son reportados con un retraso de tres meses después que el fenómeno ha sido observado en la zona 3 - 4 del océano Pacífico. El Niño provoca en la zona del Antisana disminución de la cobertura de nubes y precipitación, disminución del albedo, mayor absorción de energía por la superficie glaciar, por tanto, aumento en las tasas de fusión (derretimiento de hielo/nieve). Durante La Niña se presentan efectos contrarios sobre el glaciar (Francou, Vuille, Favier, & Cáceres, 2004).

Los glaciares responden a las fluctuaciones del clima cambiando su geometría y volumen. Estos cambios son cuantificados aplicando el balance de masa glaciológico que permite cuantificar la ganancia o pérdida de masa glaciar (cantidad de agua) en un período de tiempo definido. El balance de masa es controlado por

¹ ENSO: El Niño – Oscilación del Sur

la precipitación, los flujos radiativos (solares, atmosféricos y telúricos), turbulentos (calor sensible y latente) y la topografía del glaciar. La fuente principal de energía para derretir el hielo/nieve sobre los glaciares de alta montaña son los flujos radiativos, por tanto, cualquier cambio en la magnitud de estos flujos afectarán directamente las tasas de fusión (Favier, et al., 2004; Sicart, et al, 2016).

La presencia o ausencia de nubes tiene un efecto directo sobre la evolución de los flujos radiativos, puesto que las nubes atenúan en gran medida la radiación solar incidente de onda corta, mientras que al mismo tiempo aumenta de manera significativa la emisión de radiación infrarroja atmosférica (Favier et al., 2004).

Para evaluar los efectos de las nubes sobre los flujos radiativos es necesario determinar los cambios que estos flujos pueden experimentar en su trayectoria desde el tope superior de la tropósfera hasta la interfaz glaciar-atmósfera. Estos cambios tendrán implicaciones directas sobre el Balance de Energía Superficial (BES), balance de masa glaciológico y en el aporte del glaciar en la producción de caudales. Este tipo de análisis permitirá conocer mejor las condiciones atmosféricas que determinan la presencia o ausencia de nubes y asociarlas con el tipo de precipitación medida en la zona de estudio (Sicart et al., 2016a), estando esta última parte fuera del alcance de este trabajo de titulación.

1.2 JUSTIFICACIÓN

1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

El estudio de los procesos físicos que intervienen en el derretimiento de la nieve/hielo permite cuantificar los efectos del calentamiento global sobre los glaciares tropicales. De acuerdo con Rabatel et al., (2013), estos glaciares han experimentado un retroceso sostenido durante los últimos 35 años. Con valores de 0.6 m/año (pérdida de agua) para los glaciares con cobertura glaciar sobre los 5400 m de altura; y de 1.2 m/año para los glaciares bajo esta altitud, dicho estudio concluye que la causa principal de este retroceso es el calentamiento atmosférico.

El trópico interno está caracterizado por presentar una variación térmica anual baja (~ 1 °C) y presencia de precipitación durante todo el año (Favier et al., 2004;

Francou, et al, 2000). Por esta razón, un leve cambio en la temperatura puede alterar en gran medida las tasas de fusión del glaciar. El viento cumple un rol importante en la climatología local, cuando la velocidad del viento es débil (menor a 5 m/s) ocurren precipitaciones intensas debido a la presencia de nubes provenientes de otras zonas y nubes de tipo lenticulares formadas por la convección local. Por otro lado, cuando el viento es fuerte la temperatura disminuye, los flujos de humedad son dispersados y los flujos de calor latente toman importancia, favoreciendo la pérdida de masa glaciar por efecto de la sublimación (Favier et al., 2004; Maisincho, 2015).

En los trópicos internos, no existen estudios que relacionan el balance radiativo superficial y las propiedades radiativas de las nubes y cómo esta relación afecta a los balances de masa glaciológico y energético. Realizar este ejercicio permitirá mejorar los conocimientos sobre los procesos físicos que actúan en la fusión del hielo/nieve y el aporte del glaciar en la producción de caudales. Esta información es de importancia para fines climatológicos y para fines de tipo ingenieril, cuando se busca simular o generar información sobre la disponibilidad de agua en cuencas con aporte glaciar.

1.2.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Comparar los flujos radiativos provenientes de un cielo despejado (sin nubes) y cubierto permite cuantificar la atenuación de la energía radiativa provocada por la presencia de nubes y su impacto sobre la energía disponible para la fusión (Sicart et al., 2016). Evaluar la variabilidad espacio-temporal de la fusión, permitirá una posterior conceptualización de modelos de tipo empírico o mejorar la calibración de modelos a base física, que pudieran ser utilizados para fines de reconstrucciones paleoclimáticas o de cuantificación de la disponibilidad del recurso hídrico de origen glaciar. Tomando en cuenta, que estas metodologías son ampliamente utilizadas desde Ecuador hasta Bolivia para el aprovisionamiento de agua potable a poblaciones cercanas a los glaciares (Soruco et al., 2009).

1.2.3 JUSTIFICACIÓN METODOLOGÓICA

Distinguir diferentes tipos de nubes utilizando mediciones de radiación realizadas sobre la superficie glaciar y morrena, durante 11 años (2005 – 2015) mediante mediciones meteorológicas a nivel de media hora, permite evaluar los efectos de las nubes sobre el flujo radiativo incidente de radiación de onda corta ($0.3 < \lambda < 2.8 \mu\text{m}$) y onda larga ($5 < \lambda < 50 \mu\text{m}$) que llegan hasta la superficie glaciar. La cantidad de energía disponible para la fusión del hielo/nieve es modulada por el albedo superficial del glaciar. Por tanto, las propiedades radiativas de las nubes permitirán discriminar el tipo de cobertura de nubes, la fase de precipitación y evaluar el albedo superficial (Sicart et al., 2010).

Estudios sobre las propiedades radiativas de las nubes y su relación con el clima, realizados en el glaciar del Zongo-Bolivia, situado en el trópico externo, permite estimar las relaciones entre las nubes en cierta época del año y fenómenos extra tropicales de inyección de aire frío, llamados "surazos" (Sicart et al., 2016). En el trópico interno, específicamente en el glaciar Antisana, es necesario identificar las condiciones de las nubes, utilizando los datos de radiación infrarroja (onda larga), medidos in situ para evaluar la influencia sobre el balance radiativo y por ende en la fusión. Tomando en cuenta que este tipo de análisis no ha sido realizado anteriormente con detalle, este trabajo pretende evaluar la influencia de las nubes sobre el balance radiativo en la interfaz glaciar-atmósfera.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Describir y analizar el rol de las nubes sobre los balances de masa y energía de un glaciar de la región tropical interna.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Constituir una base de datos confiables sobre los componentes del balance radiativo en los glaciares del volcán Antisana.

- Describir las características de la radiación solar y la radiación emitidas por las nubes a lo largo del año y a una altitud de 4800 msnm, en el nevado Antisana.
- Analizar el rol de las nubes sobre el balance radiativo, la fusión, el balance de masa y los caudales en un glaciar de la región tropical interna.

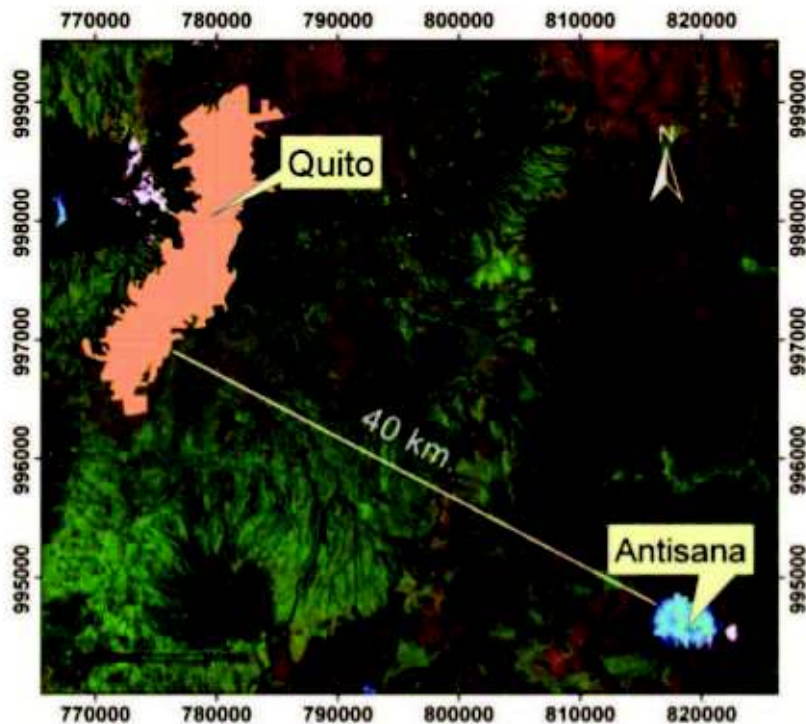
CAPÍTULO 2

ZONA DE ESTUDIO Y CLIMA

2.1 VOLCÁN ANTISANA

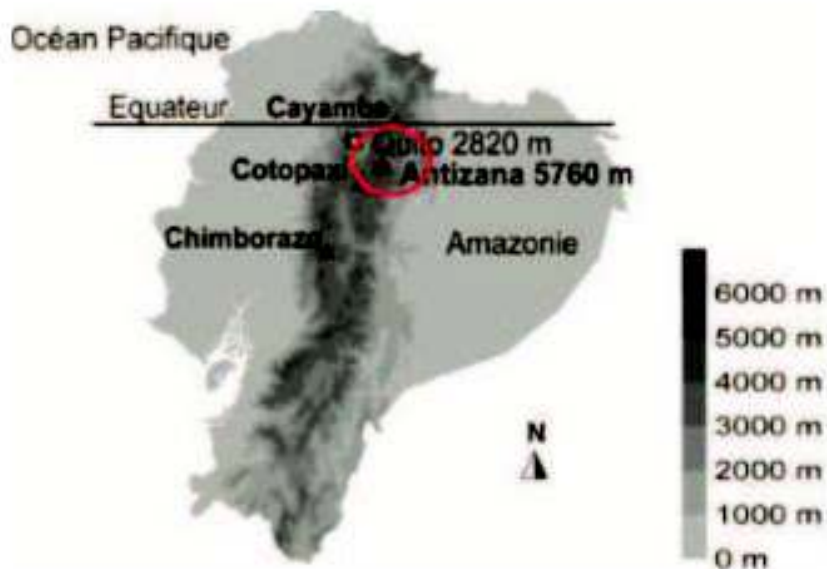
El Antisana es un volcán activo situado aproximadamente a 40 km al sur-este de la ciudad de Quito, capital del Ecuador, sus coordenadas son $0^{\circ}28'S$, $78^{\circ}09'W$ (Figura 2.1) y pertenece a la provincia de Napo. Es uno de los principales picos de la cordillera oriental de los Andes ecuatorianos (Figura 2.2), misma que está fuertemente expuesta a flujos de humedad provenientes de la cuenca del Amazonas (Villacís, 2008). El último inventario de glaciares, realizado en 2006, mostró que los glaciares cubren un área de $12,2 \text{ km}^2$ (Basantes, 2015) con un total de 17 lenguas glaciales (Hastenrath, 1981).

FIGURA 2.1: UBICACIÓN DEL VOLCÁN ANTISANA RESPECTO A LA CIUDAD DE QUITO



Fuente: (Mena, 2010)

FIGURA 2.2: UBICACIÓN DEL VOLCAN ANTISANA EN LA CORDILLERA ORIENTAL DEL ECUADOR



Fuente: (Mena, 2010)

2.1.1 GLACIAR 15

Situado en el flanco noroccidental del macizo, entre los 4800 m.s.n.m. y 5760 m.s.n.m, posee 2 Km de largo de cobertura glaciar. En 1998 tenía un área aproximadamente de 0.74 km². Desde 1956, la parte baja (< 5000 m.s.n.m.) ha sido separada en dos lenguas glaciares, llamadas 15 α y 15 β , respectivamente (Francou et al., 2000).

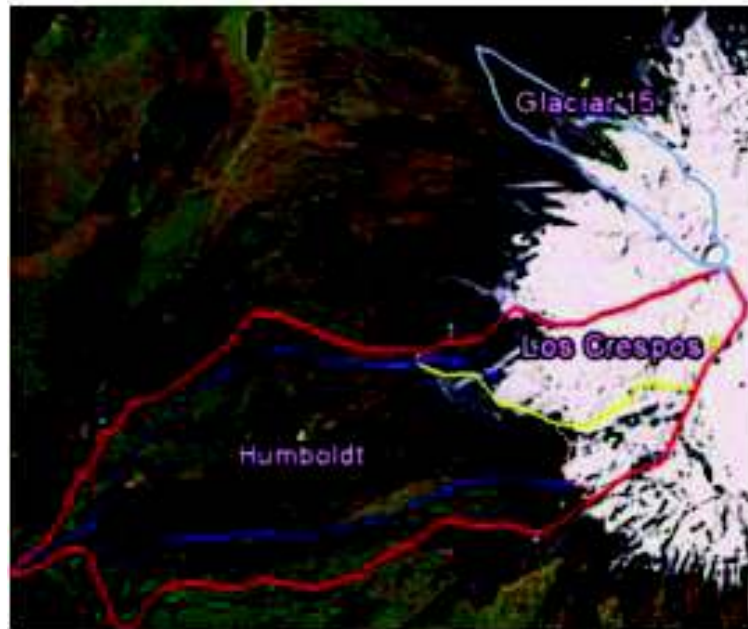
El glaciar 15 (Figura 2.3) tiene una longitud de 1,8 km y un ancho promedio de 0,4 km. El área es 0.7 km² y se encuentra entre los 4800 y 5760 m.s.n.m. El glaciar tiene una pendiente media general de 25°, 18° en la zona de ablación y menos de 10° a 4900 m, donde se monitorea su meteorología (Villacís, 2008).

2.1.2 GLACIAR 12

También llamado Los Crespos (Figura 2.3), tiene 2.4 km de largo, un ancho promedio de 0.7 km y un área de 1.7 km², se encuentra entre los 4730 y 5670

m.s.n.m. La pendiente promedio de todo el glaciar es de 19° , 13° por debajo de 4900 m.s.n.m. y aproximadamente 8° a 4770 m.s.n.m; altura a la que se monitorea su meteorología. El glaciar Los Crespos alimenta el curso de agua de la cuenca Humboldt, ubicada a 4010 m.s.n.m., aguas abajo de la estación limnigráfica Los Crespos a una altitud de 4520 m (Villacís, 2008).

FIGURA 2.3: UBICACIÓN DE LA CUENCAS GLACIAR 15(LÍNEA CELESTE), LOS CRESPOS Y HUMBOLT (LÍNEA AZUL), MONITOREADAS EN LA ZONA OCCIDENTAL DEL VOLCÁN ANTISANA



Fuente: (Mena, 2010)

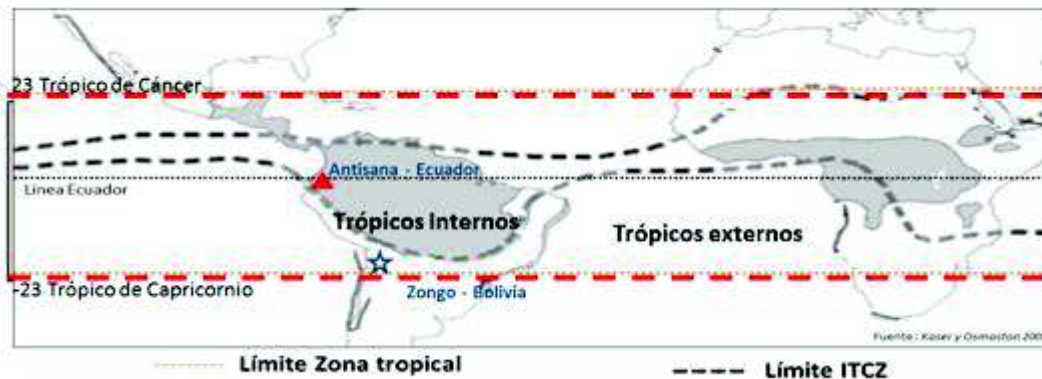
2.2 LA ZONA TROPICAL ANDINA

Los Andes tropicales corresponden a la parte de la Cordillera que se extiende más de 1500 km entre 11° N y 23° S, desde el oeste de Venezuela hasta el norte de Chile y Argentina, zona que incluye a Ecuador. Esta parte de los Andes se caracteriza por poseer altiplanos en medio de dos cadenas montañosas paralelas, la más grande en Perú y otra en Bolivia (Maisincho, 2015). En estas cadenas montañosas, numerosos picos, nevados y volcanes superan los 5000 m.s.n.m.

2.2.1 LA ZONA TROPICAL INTERNA Y EXTERNA

Desde el punto de vista climático, esta área está dividida en dos: 1) los trópicos internos, donde la precipitación estacional es muy baja; y 2) la región tropical exterior, donde existen, una estación seca y una estación lluviosa, que a su vez poseen una estacionalidad de temperatura (Figura 2.4). En Bolivia y Perú, la estación seca se observa de mayo a septiembre y la temporada de lluvias de octubre a marzo. En la región tropical interna, lugar donde se encuentra el volcán Antisana, la radiación solar incidente en la parte superior de la atmósfera varía poco durante el año, la humedad y la nubosidad permanecen casi sin cambios a lo largo del año (Rabatel et al., 2013).

FIGURA 2.4: ZONA TROPICAL INTERNA Y EXTERNA

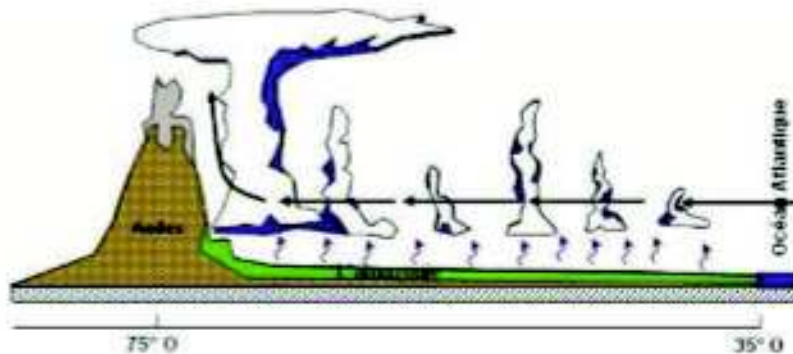


Fuente:(Georg Kaser & Osmaston, 2002)

2.2 CLIMATOLOGÍA

El trópico interno se caracteriza por una atmósfera térmicamente homogénea con humedad ligeramente variable durante todo el año (Kaser, 2001), es así que el volcán Antisana está expuesto a un flujo de humedad proveniente de la cuenca del Amazonas (Figura 2.5), el cual da lugar a precipitaciones en todos los meses del año (Garreaud & Aceituno, 2007). Sin embargo, existen dos máximos, en abril y octubre; y mínimos en julio-agosto y diciembre. En la cuenca del glaciar 15, a 4850 m.s.n.m. la precipitación anual oscila entre 800 y 1300 mm, durante el periodo 2000-2008 (Maisincho, 2015).

FIGURA 2.5: ESQUEMA DEL MOVIMIENTO DE HUMEDAD HACIA LOS ANDES DESDE EL ATLÁNTICO

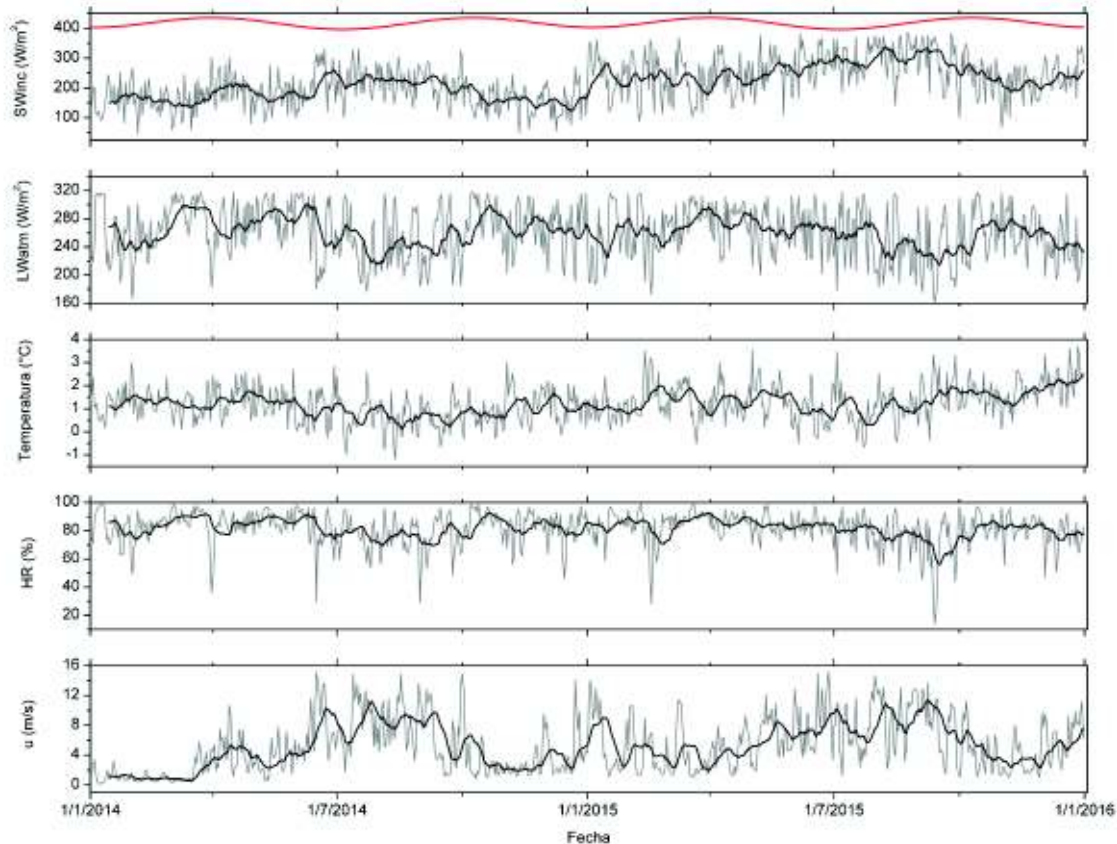


Fuente: (Ruiz, 2015)

Las mediciones de la humedad relativa, la temperatura del aire y la velocidad del viento realizadas en los años 2014 y 2015, a 4850 m.s.n.m. en el glaciar 15 del volcán Antisana (Figura 2.6) muestran una desviación estándar de las mediciones diarias (730 días) son: 11.74% para la humedad relativa, 0.79°C para la temperatura y 3.70 *m/s* para la velocidad del viento. Esto confirma que, en la región andina de Ecuador, las variaciones de humedad y temperatura no son notorias como para caracterizar una estacionalidad. La temperatura promedio es de 1.03°C.

En el volcán Antisana, la velocidad del viento juega un papel importante en la distribución de la energía. Es más fuerte en los meses de junio, julio, agosto y septiembre (Figura 2.6), cuando las velocidades diarias promedio son a menudo mayores a 9 *m/s*, mientras que en los demás meses la velocidad promedio del viento es de 4 *m/s*. Por la noche, las superficies de gran elevación sufren un enfriamiento radiativo y se intensifican los vientos catabáticos (Cogley & Adams, 1998; Oerlemans & Grisogono, 2002).

FIGURA 2.6: PROMEDIOS DIARIOS DE RADIACIÓN DE ONDA CORTA Y LARGA, TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y VELOCIDAD DEL VIENTO A 4850 M DE ALTITUD, EN EL GLACIAR 15 DEL VOLCÁN ANTISANA, ENTRE 1 DE ENERO DE 2014 Y 31 DE DICIEMBRE DE 2015. LA LÍNEA NEGRA PERTENECE A LA MEDIA MÓVIL DE 15 DÍAS Y LA LÍNEA ROJA REPRESENTA LA RADIACIÓN DE ONDA CORTA EXTRATERRESTE.



La cobertura de nubes modula la contribución energética proveniente de la radiación solar hacia la superficie. Por ejemplo, los días con alta nubosidad presentan una disminución en los valores de radiación de onda corta incidente y un incremento en la radiación de onda larga proveniente de la atmósfera.

La presencia o ausencia de nubes tiene un impacto en los ciclos de energía en la superficie del glaciar, balances de masa glaciológico y en la posición de la línea de nieve en altitud (Favier et al., 2004). En Ecuador, los procesos de acumulación (nieve) y la ablación (fusión + sublimación) ocurren sin interrupciones (Favier et al., 2008), por tanto la fusión continua implica que no existe una capa de nieve permanente sobre la zona de ablación del glaciar.

Los cambios en el balance de energía de superficie están directamente relacionados con los cambios de albedo, mientras que la separación de la precipitación sólida y líquida es controlada por la variación en altitud de la isoterma 0°C (Maisincho, 2015).

La climatología del Antisana es influenciada por eventos planetarios como el fenómeno de El Niño (ENSO) (Francou et al., 2004; Vuille et al., 2008). Existe un desfase de 3 meses entre la respuesta local de la atmósfera y la señal ENSO en la zona 3-4 del Pacífico. La fase cálida (El Niño) del ENSO se asocian en los Andes tropicales al calentamiento y un déficit de lluvia (no siempre se cumple), que resultan en balances de masa negativos (Francou & Pouyaud, 2008; Francou et al., 2004; Vuille et al., 2008). A la inversa, las fases La Nina, más frío y más húmedo, inducen balances más equilibrados o incluso positivos (Francou et al., 2004).

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

3.1 EL BALANCE DE ENERGÍA SUPERFICIAL (BES)

El balance de energía superficial (BES) analiza el intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera y permite la cantidad de energía disponible para los procesos de sublimación, fusión y/o congelación (Singh, et al., 2011).

3.1.1 LA CAPA LÍMITE SUPERFICIAL

El BES concierne las interacciones entre la superficie de la tierra y la atmósfera. La influencia de la superficie terrestre a la atmósfera, está limitada a la capa baja de la atmósfera, llamada tropósfera (aproximadamente 15 km en la zona tropical). En esta capa se producen eventos de turbulencia, que es el calentamiento intenso causado por la fricción entre la atmósfera y la superficie, y también por desprendimiento de las masas de aire recalentado cerca del suelo (Brutsaert, 1982).

La capa límite atmosférica varía su altura en función del ciclo solar diurno, varios kilómetros en el día mientras el sol calienta la superficie terrestre; y a menos de 100 m en la noche. La capa límite de la superficie caracterizada por una intensa turbulencia también varía de acuerdo al ciclo solar, desde aproximadamente 50 m en el día a pocos metros en la noche. A pesar de su gran variabilidad en el largo plazo, esta capa es homogénea horizontalmente en escalas de tiempo del orden de 10 minutos (Wagnon, 1999).

3.1.2 EL BALANCE DE ENERGIA

Para formular la ecuación del BES se considera el principio de conservación de la energía donde por convección los flujos de energía positivos responden a flujos dirigidos hacia la superficie (ganancia de energía), mientras que, los flujos de energía negativos responden a flujos emitidos por la superficie (pérdida de energía).

Se asume como despreciable la transferencia horizontal de calor sobre la superficie glaciar; reduciendo el análisis a la siguiente expresión (Wagnon, 1999).

$$R + LE + H + Qp = \Delta Q_M + \Delta Q_S = BES \quad (W/m^2) \quad (3.2)$$

donde:

R : radiación neta (W/m^2)

H : flujos turbulentos de calor sensible (W/m^2)

LE : flujos turbulentes de calor latente (W/m^2)

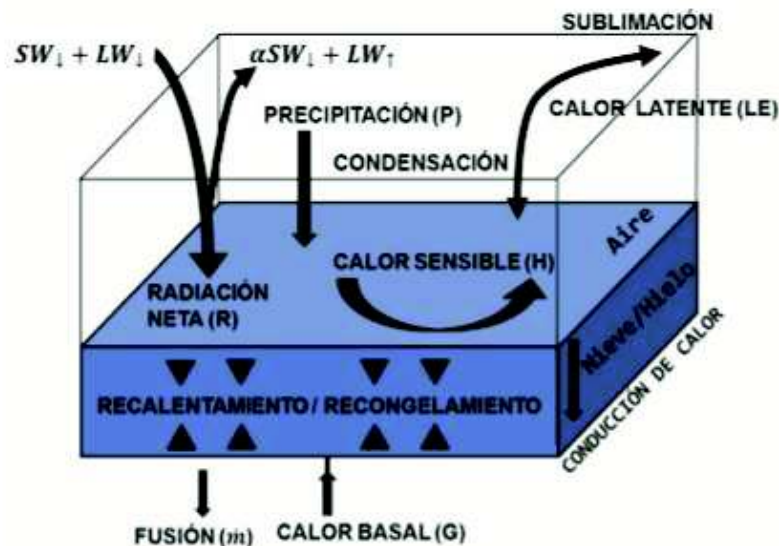
Qp : aporte energético de la precipitación (W/m^2)

ΔQ_M : variación de calor latente almacenado en el glaciar debido a la fusión o recongelamiento (W/m^2)

ΔQ_S : variación de calor sensible debido al cambio de temperatura del glaciar (W/m^2)

La figura 3.1, muestra todos los flujos que intervienen en el proceso de intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera, flujos necesarios para poder estimar el BES.

FIGURA 3.1: FLUJOS DE ENERGÍA QUE INTERVIENEN EL BALANCE DE ENERGÍA SUPERFICIAL, LAS TRASFERENCIAS DE ENERGÍA SE INDICAN CON FLECHAS



Fuente: (Gualco, 2018)

3.1.3 RADIACIÓN NETA

La radiación neta es la resultante del balance de las radiaciones de onda corta y larga incidentes en la superficie y emitidas hacia la atmósfera, responde a la ecuación siguiente:

$$R = SW_{inc} (1 - \alpha) + LW_{atm} - LW_{out} \quad (W/m^2) \quad (3.3)$$

donde:

SW_{inc} : radiación de onda corta incidente (W/m^2)

α : albedo y es igual a la relación SW_{out}/SW_{inc}

LW_{atm} : radiación de onda larga emitida por la atmósfera (W/m^2)

LW_{out} : radiación de onda larga emitida por la superficie (W/m^2)

3.1.3.1 Radiación de onda corta

Radiación de onda corta incidente

La radiación de onda corta es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol, con longitudes de onda λ entre los valores de $0.15 \mu m$ y $3 \mu m$. A partir de esto se ha definido la constante solar $I_0 = 1368 W/m^2$, como el flujo medio de radiación solar que llega al tope de la atmósfera, por unidad de tiempo y superficie (Oke & Cleugh, 1987).

La radiación solar en el tope de la tropósfera (S_{extra}) supone la forma esférica de la Tierra y la ubicación del sitio de estudio: longitud (ω), latitud (φ), declinación solar (δ)², hora y fecha de cálculo (hora solar reducida) (Corripio, 2002). El cálculo de la S_{extra} (ecuación 3.4) permite conocer el ángulo cenital (z)³ y el ciclo anual de radiación antes de interactuar con la atmósfera (Favier et al., 2004).

$$S_{extra} = I_0(\sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega) = I_0 \cos z \quad (\text{en } W/m^2) \quad (3.4)$$

² La declinación del sol es el ángulo formado entre el ecuador y una línea trazada desde el centro de la Tierra hasta el centro del sol.

³ El cenit es el ángulo formado entre el horizonte y el sol. Se cuenta desde la horizontal hacia la vertical. Si el observador se encuentra justo debajo del sol, entonces el zenit es un ángulo de 90° .

Para una superficie con pendiente β y acimut A_z (medido desde el sur en sentido antihorario), S_{extra} se expresa como *Sipiente* en la ecuación 3.5.

$$S_{ipiente} = I_0 \left[\cos \beta \cos z + \sin \beta \left(\cos A_z \left(\frac{\sin \varphi \cos z - \sin \delta}{\cos \varphi} \right) - \sin A_z (\cos \delta \sin \omega) \right) \right] \quad (\text{en } W/m^2) \quad (3.5)$$

Radiación de onda corta saliente y albedo

La radiación de onda corta reflejada o saliente (SW_{out}) en el glaciar depende del albedo. El albedo varía dependiendo del tipo de superficie y humedad del ambiente, en el glaciar generalmente varía entre 0.15 y 0.9 (Cuffey & Paterson, 2010).

3.1.3.2 Radiación de onda larga

Radiación de onda larga incidente

La radiación de onda larga incidente o proveniente de la atmósfera (LW_{atm}), corresponde a longitudes de onda λ , entre $3\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$ (Wagnon, 1999). En la región tropical es proveniente de las nubes, vapor de agua, dióxido de carbono, ozono y metano presente en la atmósfera. Por tanto, un cielo nublado y con alta humedad incrementa LW_{atm} y favorecen en el incremento de temperatura a la del aire, mientras que, un cielo despejado y seco reduce LW_{atm} , enfriando la superficie del glaciar, especialmente durante las noches (Pellicciotti, et al., 2009).

En un cielo nublado, la radiación de onda larga incidente depende de la porción de cielo cubierto por nubes. El factor de nubes adimensional (n) propuesto por Sicart (2002) indica la atenuación de la radiación de onda corta.

$$n = 1.3 - 1.4 \frac{SW_{inc}}{S_{extra}} \quad (3.6)$$

Por lo tanto, la emisión atmosférica en cielo despejado (L_{clear}) se puede expresar mediante la ecuación 3.5 (Brutsaert, 1975).

$$L_{clear} = 1,24 \left(\frac{e}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \sigma T^4 \quad (3.7)$$

donde:

e : presión de vapor del aire en los primeros metros sobre la superficie del glaciar (hPa)

T : temperatura del aire (K)

σ : constante de Stefan – Boltzman; $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 K^4)$, bajo condiciones

Radiación de onda larga emitida por la superficie

Al igual que las nubes, el glaciar emite radiación infrarroja con emisividad, (ε) entre 0.92 y 0.99 (Singh et al., 2011). Adicionalmente una pequeña parte de la radiación de onda larga incidente es reflejada por la superficie del glaciar, con lo que LW_{out} se estima mediante la ecuación 3.8.

$$LW_{out} = -\varepsilon \sigma T^4 + (1 - \varepsilon)LW_{atm} \quad (3.8)$$

donde:

ε : emisividad atmosférica

Cuando LW_{out} es negativo, indica pérdida de energía y en condiciones de fusión $T = 273.15$ K y $LW_{out} = 315.6$ W/m² (Gualco, 2018).

3.1.4 FLUJOS TURBULENTOS

Los flujos turbulentos están relacionados a la turbulencia mecánica⁴ y la convección térmica⁵ y, que dependen la velocidad del viento y de la rugosidad de la superficie. Mientras que el transporte de calor depende de la diferencia de humedad y temperatura entre la superficie del glaciar y la capa límite (Garrat, 1994).

Cuando el aire que circula en la capa límite es más caliente que la superficie, existe una turbulencia que transfiere calor sensible H hacia la superficie. Mientras que, si

⁴ Efecto producido cuando masas de aire a gran nivel realizan un esfuerzo cortante sobre la capa límite atmosférica con dirección normal a la superficie glaciar.

⁵ Existencia de remolinos que provocan una mezcla del aire verticalmente. Se originan cuando masa de aire transportadas por el viento siguen las diferencias de presión a lo largo de la superficie glaciar y chocan entre sí debido a la topografía irregular del terreno.

existe aire seco superpuesto, la turbulencia transfiere humedad desde la superficie para mantener la saturación del aire adyacente, por tanto, la superficie entrega calor latente LE a la atmósfera, este proceso da lugar a la sublimación o evaporación del glaciar, enfriándose debido al consumo de energía durante el proceso (Cuffey & Paterson, 2010).

Todas las fórmulas descritas anteriormente servirán para calcular la radiación de onda corta extraterrestre (S_{extra}), también servirán para corregir y rellenar la serie de datos para el cálculo de la fusión y el BES. Cabe mencionar, que para el cálculo de estos dos últimos utilizamos los datos meteorológicos medidos en la Morrena del glaciar 15 α , mismos que fueron extrapolados a 4900 m.s.n.m. sobre la superficie del glaciar 15 α del volcán Antisana.

3.2 BALANCE DE MASA (BM)

El balance de masa de un glaciar permite conocer el cambio de masa del mismo en un intervalo de tiempo específico (por lo general un año hidrológico, en Ecuador el año hidrológico inicia en enero y finaliza en diciembre de cada año). Si bien su dimensión es [M] (masa), se lo expresa en metros de agua equivalente (m a.e) para tener una compatibilidad con unidades en un contexto hidrológico. El balance de masa calculado mediante el método glaciológico, Bn , posee un signo; si es positivo, se habla de una zona de acumulación, mientras que, si es negativo, se habla de una zona de ablación. La línea en la cual se interceptan ambas zonas se denomina Línea de Equilibrio Altitudinal o ELA (Equilibrium Line Altitude) y la razón entre el área de la zona de acumulación y el área total del glaciar se denomina Proporción del Área de Acumulación o AAR (Accumulation Area Ratio). Los dos parámetros poseen una relación lineal con el balance de masa del glaciar (Rabatel, 2005).

El método glaciológico o directo determina directamente el balance de masa neto, Bn . Su finalidad es determinar la distribución espacial del balance para un año mediante el muestreo en la superficie del glaciar. Existen dos zonas sobre un glaciar, la de ablación, donde la fusión del hielo se mide por las alturas de emergencia de las balizas insertadas en el glaciar; y la zona de acumulación, donde se mide la cantidad de nieve mediante perforación. Finalmente, para estimar el

balance de masa total del glaciar se realiza los balances de masa en cada punto donde se instalaron las balizas (Leonardini, et al., 2012).

Se realiza una medición mensual mediante las balizas (Figura 3.1) instaladas en la parte inferior del glaciar, en la zona de ablación, de acuerdo a la ecuación 3.9.

$$bn = \rho_0 \Delta_z + \rho \Delta_y \quad (3.9)$$

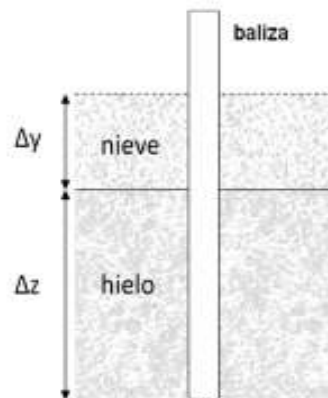
donde:

bn: balance de masa

ρ_0 y ρ : constantes de densidad relativa del hielo y la nieve respectivamente.

Δ_z y Δ_y : variaciones del espesor de hielo y nieve respectivamente.

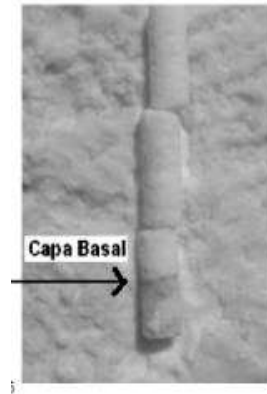
FIGURA 3.2: DIAGRAMA DE LA VARIACIÓN DE LA ALTURA DE NIEVE Y HIELO EN UN PERIODO DE TIEMPO DETERMINADO



Fuente: (Leonardini et al., 2012)

En la parte superior o zona de acumulación del glaciar, se realizan dos o tres perforaciones de nieve/hielo con un perforador PICO (Polar Ice Coring Office) para medir la acumulación (ver Figura 3.2). El objetivo es conocer estratigráficamente la capa basal, que es la capa a partir de la cual se acumula la precipitación sólida correspondiente a un año hidrológico. Esta capa, puede ser identificada visualmente porque es la capa más oscura del testigo o bloque de hielo y corresponde al pico de máxima densidad (Figura 3.2) (Leonardini et al., 2012).

FIGURA 3.3: TESTIGO DE HIELO/NIEVE EN LA CUAL PUEDE IDENTIFICARSE LA CAPA BASAL



Fuente: (Leonardini et al., 2012)

Luego, en un número i de muestras sucesivas, desde la superficie hasta la capa basal se estima la masa neta acumulada, mediante la ecuación 3.10.

$$bn = \sum_i \rho_i h_i \quad (3.10)$$

donde:

ρ_i : densidad relativa de la muestra de la altura h_i

Finalmente, para calcular el balance de masa total del glaciar, se discretizan los valores de balance de masa en rangos altitudinales j (cada 100m) y se pondera cada rango por el área relativa respectiva (balance de masa específico, Bn) (Leonardini et al., 2012).

$$Bn = \sum_{j=1}^i b_n^j \left(\frac{S_j}{S_g} \right) \quad (3.11)$$

donde:

b_n^j : balance de masa del rango altitudinal j

S_j : área del rango antitudinal j

S_g : área total del glaciar

Los datos glaciológicos que se utilizan en este estudio, son valores mensuales de balance de masa en el glaciar 15 del volcán Antisana en la banda de 4850 a 4900

m de altitud que fueron corregidos por Basantes et al. (2016), durante el periodo 2005-2012. Lamentablemente no se dispone de datos tratados después del año 2012.

3.3 LA OSCILACIÓN DEL SUR

La Oscilación del Sur es el fenómeno más importante de la atmósfera oceánica, está asociada a cambios interanuales de las condiciones atmosféricas sobre los océanos Pacífico e Índico ecuatoriales. Esta oscilación es causada por la variación interanual de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico, variaciones que a su vez son causadas por el cambio de los vientos de la superficie (NOAA, 2018).

3.3.1 EL NIÑO – OSCILACIÓN DEL SUR

En la fase positiva de la Oscilación del Sur, la presión atmosférica es relativamente alta en la zona sureste del Océano Pacífico y una presión atmosférica baja en el Pacífico Occidental. Esto ocurre cuando los vientos soplan hacia el noroeste en la parte tropical, estos vientos llamados “alisios” mantienen corrientes oceánicas que transportan agua caliente hacia el oeste, provocando que la temperatura superficial del mar sea mayor a la normal en la parte occidental del océano Pacífico tropical. Al contrario, la temperatura en la parte oriental del Pacífico es baja durante la mayor parte del año debido a factores que producen surgencia ecuatorial y advección de aguas frías (Fernández & Ramírez, 1991).

Cuando los vientos alisios son fuertes, la corriente Ecuatorial del Sur se intensifica. Como consecuencia se tiene acumulación de agua tibia en el Pacífico Occidental, provocando que el nivel del mar sea mayor; y cuando los vientos alisios cesan, el agua acumulada en el Pacífico Occidental se desplaza hacia el este, principalmente mediante ondas sub-superficiales, llamadas ondas ecuatoriales internas de Kelvin, las mismas pueden llegar a tener una velocidad de 3m/s, por lo que pueden tardar 3 meses en atravesar el Océano Pacífico (Fernández & Ramírez, 1991). Bajo condiciones de ENSO, las temperaturas superficiales del mar son altas, los vientos

alisios son débiles y las diferencias de la presión superficial a lo largo del Pacífico tropical son pequeñas (Philander, 1985).

3.3.2 LA NIÑA

La fase de la Oscilación del Sur asociado a El Niño, es precedida y seguida por episodios en los cuales las temperaturas superficiales del agua son usualmente bajas en el Pacífico Oriental y Central; y los vientos alisios son muy fuertes. A esta fase de la Oscilación del Sur se la llama La Niña. Sin embargo, los eventos La Niña no están asociados a consecuencias climáticas tan desastrosas como las que puede producir un evento El Niño (Philander, 1985).

3.3.3 ÍNDICE MEI

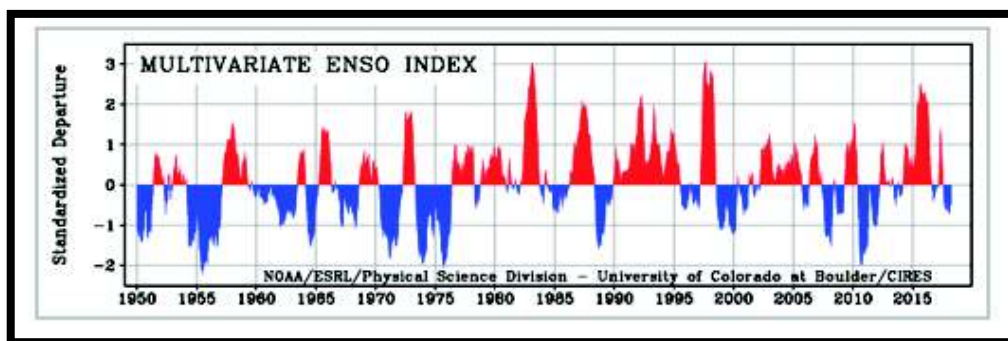
La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), administración de los Estados Unidos que se encarga de monitorear las condiciones de los océanos y la atmósfera, intenta monitorear el ENSO a partir del Índice Multivariado ENSO (MEI), basado en seis principales variables observadas en el Pacífico tropical: presión del nivel del mar, zona y meridional del viento de superficie, temperatura del aire superficial, temperatura de la superficie del mar, y nubosidad total del cielo. Estas observaciones se han recopilado y publicado en ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) durante muchos años. El MEI se calcula para temporadas bimensuales deslizantes (diciembre / enero, enero / febrero, ..., noviembre / diciembre). El MEI se calcula como el primer Componente Principal (PC) sin rotar de los seis campos observados combinados. Esto se logra normalizando la varianza total de cada campo y luego realizando la extracción de la primera PC en la matriz de covarianza de los campos combinados. Para mantener el MEI comparable, todos los valores estacionales están estandarizados con respecto a cada temporada y al período de referencia de 1950-1993 (NOAA, 2018).

El MEI se ha desarrollado principalmente con fines de investigación (Figura 3.3), por tanto en caso de analizar su evolución mes a mes es necesario conocer que

valores negativos del MEI representan la fase fría (La Niña), mientras que valores positivos MEI representan la fase cálida (El Niño) (NOAA, 2018).

Los glaciares tropicales no solo reflejan las condiciones climáticas a escala local, sino que se rigen principalmente por el forzamiento a gran escala. Está claro que la variabilidad ENSO en el Pacífico es el principal factor que obliga a la inestabilidad del balance de masa de los glaciares en los Andes tropicales. Una mayor frecuencia de eventos largos e intensos El Niño aceleraron considerablemente el retroceso de los glaciares desde finales de la década de 1970, mientras que los eventos fríos cortos y menos pronunciados (La Niña) permitieron que los glaciares mantuvieran o ganaran masa. Estos efectos de la Oscilación del Sur se perciben en los Andes tres meses después de su ocurrencia en el océano Pacífico (Francou, et al., 2005).

FIGURA 3.4: ÍNDICE MULTIVARIABLE ENSO, MEI POR SUS SIGLAS EN INGLES



Fuente: (NOAA, 2018)

3.4 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Los criterios de evaluación son medidas matemáticas cuya función es valorar una variable y su ajuste respecto a otra. Proporcionan una evaluación objetiva de la cercanía y/o dependencia entre dos o más variables analizadas (Gualco, 2018).

3.4.1 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (R)

Estadísticamente, el coeficiente de correlación de Pearson (R) es la medida de la relación lineal existente entre dos variables cuantitativas y es independiente de la escala de medida de las variables en estudio y se calcula de acuerdo a la ecuación 3.12.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (3.12)$$

donde:

O_i y P_i : variables a analizar

\bar{O} y \bar{P} : valor promedio de cada serie

Si $R = 1$, existe una correlación lineal positiva perfecta. El índice indica una dependencia lineal total entre las dos variables. Si $0 < R < 1$, existe una correlación lineal positiva. Si $R = 0$, no existe relación lineal, pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables. Si $-1 < R < 0$, existe una correlación lineal negativa. Finalmente, si $R = -1$, existe una correlación lineal negativa perfecta, indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa (Gualco, 2018).

3.4.2 COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)

Es definido como el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, estima la dispersión combinada contará la dispersión individual de las series de las dos variables (Gualco, 2018).

3.5 ESTADO DEL ARTE

3.5.1 PROPIEDADES RADIATIVAS DE LAS NUBES SOBRE UN GLACIAR TROPICAL BOLIVIANO: VARIACIONES ESTACIONALES Y RELACIÓN CON LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA REGIONAL

Las variaciones estacionales e interanuales en el balance de masa dependen de las propiedades de nubes y precipitación. Sicart et al. (2011) mostró que se pueden distinguir tres estaciones en los trópicos exteriores de Bolivia. En la estación seca, de mayo a agosto, la tasa de fusión es baja, debido al déficit de radiación de onda larga por causa de una atmósfera delgada sin nubes. Durante la temporada de transición, de septiembre a noviembre, la tasa de fusión aumenta debido a la alta radiación solar, con el sol cerca del cenit y el bajo albedo glaciar. Durante la temporada de acumulación en la estación húmeda a partir de diciembre a febrero, la tasa de fusión disminuye por el efecto albedo. Sin embargo, la fusión continúa debido a la alta radiación de onda larga emitida por nubes convectivas.

Para evidenciar el cambio en la cobertura de nubes, Sicart estudió las propiedades radiativas de las nubes en el glaciar Zongo ubicado en el Macizo Huayna Potosí ($16^{\circ}15'S$, $68^{\circ}10'W$, Cordillera Real, Bolivia), puesto que, en latitudes bajas, cambios de cobertura de nubes en cada una de las temporadas y la precipitación controlan el balance de masas de los glaciares. El periodo de estudio fue desde el año 2005 al año 2013.

Los cálculos de los índices de emisividad, transmisividad y forzamiento radiativo los realizó mediante ecuaciones que más adelante se explican (capítulo 4), porque esta tesis sigue la misma metodología de Sicart (2015) en Bolivia.

La atenuación de radiación de onda corta y la emisión de radiación de onda larga son mayores en la temporada de verano húmedo, que ocurre en los meses de diciembre, enero y febrero (DEF), que en la temporada de invierno seco, que ocurre en los meses de junio, julio y agosto (JJA), probablemente esto se debe a que en DEF existe la presencia de nubes bajas calientes (cúmulos) asociadas con la convección local, mientras que, en JJA la nubes son frecuentemente altoestratos asociados con perturbaciones extra tropicales.

La radiación solar fue alta durante todo el año y el forzamiento radiativo fuertemente negativo con medidas mensuales que van desde -60 a -110 W/m^2 , desde la temporada seca a la húmeda respectivamente.

3.5.2 ESTUDIO DE LA RADIACIÓN DE ONDA LARGA EN LOS GLACIARES TROPICALES ANDINOS

En entornos de montaña, la radiación de onda larga proporciona grandes cantidades de energía para superficies de nieve, con alto albedo y puede dominar el equilibrio energético. Sicart (2010) en su estudio examinó los controles atmosféricos de la radiación de onda larga del cielo en el glaciar Zongo ($16^{\circ}15'S$, $68^{\circ}10'W$) en Bolivia, durante todo un año. Los glaciares tropicales se caracterizan por una estacionalidad pronunciada de la radiación de onda larga, debido a las emisiones de nubes durante la estación húmeda que aumentan fuertemente la pequeña emisividad de la atmósfera fina y seca de cielo despejado a altitudes muy altas. La radiación del cielo despejado se simula bien en función de la temperatura y la humedad del aire, pero los cambios de humedad en los perfiles atmosféricos desde el día hasta la noche conllevan diferentes coeficientes optimizados para datos diarios y horario. La emisión en la nube, se estima utilizando la transmisividad atmosférica diaria para la radiación solar. Las correlaciones parciales mostraron que en las montañas altas las emisiones de las nubes controlan las variaciones de la radiación de onda larga, mucho más que la emisividad del cielo despejado y la temperatura de la atmósfera emisora. Una prueba independiente en el glaciar Antisana en Ecuador resultó en una parametrización robusta para los Andes Centrales.

CAPÍTULO 4

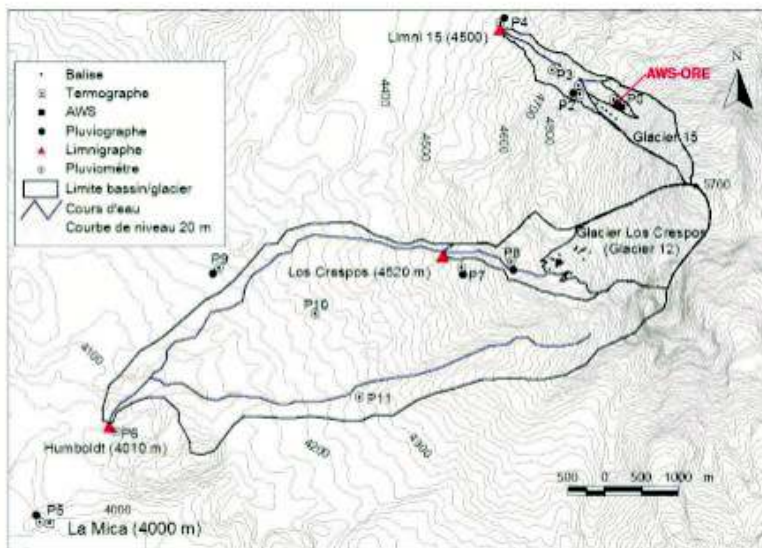
DATOS Y MÉTODO

4.1 DATOS

La calidad de los datos a utilizarse en trabajos de investigación es crucial porque de esto dependerán los resultados que se obtendrá posteriormente. Por esta razón, se realizó un control de calidad riguroso a la información hidrometeorológica y glaciológica, aplicando intercomparaciones entre estaciones vecinas, protocolos establecidos para identificar/corregir datos atípicos y estadística básica. La base de datos utilizada en este estudio fue proporcionada por el Laboratorio Mixto Internacional de Glaciares y Recursos Agua en los Andes Tropicales e Indicadores del Ambiente (LMI-GREATICE por sus siglas en francés, www.es.great-ice.ird.fr/) y el Observatorio Glaciares, un Observatorio del Clima (GLACIOCLIM). El LMI-GREATICE y GLACIOCLIM, en Ecuador opera y mantiene su red monitoreo de glaciares mediante el convenio de cooperación con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI, la Escuela Politécnica Nacional y la Universidad Regional Amazónica Ikiam.

Este estudio se basa en medidas realizadas por la estación meteorológica automática ORE del Observatorio Glacioclim, instalada en la morrena lateral del glaciar 15α a 4850 m.s.n.m. La estación proporciona mediciones cada media hora, mismas que fueron promediadas a nivel diario para los posteriores cálculos. Las medidas de altura del nivel de agua son registradas por la estación limnigráfica, Los Crespos a 4521 m.s.n.m. Los instrumentos de medición están ubicados en las cuencas del volcán Antisana de acuerdo a la Figura 4.1 y la Tabla 4.1 que sintetizan las magnitudes físicas y las abreviaturas de las variables utilizadas.

FIGURA 4.1: UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA ORE Y ESTACIÓN LIMNIGRÁFICA LOS CRESPOS



Fuente: (Ruiz, 2015)

TABLA 4.1: PARÁMETROS FÍSICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO, MEDIDOS POR LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA ORE

Parámetro	Abreviación	Detalles
Radiación de onda corta incidente y reflejada	SW_{inc} y SW_{ref} (W/m^2)	$0.3\mu m < \lambda < 2.8\mu m$ medición a 1m
Radiación de onda larga incidente y reflejada	LW_{atm} y LW_{surf} (W/m^2)	$5\mu m < \lambda < 50\mu m$ medición a 1m
Temperatura	T ($^{\circ}C$)	medición a 1m
Humedad relativa	HR (%)	medición a 1 m
Velocidad del viento	u (m/s)	medición a 2.3 m

4.1.1 DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN

La disponibilidad de datos meteorológicos se presenta en la Figura 4.2. Para este trabajo se requiere de información continua y sin vacíos, por tanto, el período con mayor cantidad de información está comprendido del 01 de enero de 2005 al 31 diciembre de 2015.

FIGURA 4.2: DATOS DISPONIBLES EN EL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)



4.1.2 DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos meteorológicos registrados por la estación ORE son: radiación incidente de onda corta y larga, radiación reflejada de onda corta y larga, temperatura ventilada y humedad relativa. El control de los datos se realizó de acuerdo a criterios especificados en Delachaux (2005).

Radiación de onda corta incidente (SW_{inc} en W/m^2) y reflejada (SW_{ref} en W/m^2).

La radiación solar o de onda corta, teóricamente tiene un valor de cero en las noches, sin embargo, el radiómetro registra valores entre -2 y $+2 W/m^2$; por tanto, durante el tratamiento de datos se estableció el valor de cero, puesto que durante la noche la radiación de onda corta es nula. Durante la jornada diurna la radiación solar alcanza su máximo valor alrededor del mediodía (hasta $1000-1200 W/m^2$). La

forma de la curva en un día despejado es una campana. La constante solar, es decir, la radiación solar que llega fuera de la atmósfera, es $1367 \text{ W/m}^2 \pm 3\%$, que a priori es el valor máximo para SW_{inc} ; pero en los trópicos, en un glaciar, el efecto lupa debido a la presencia de nubes dispersas y el efecto horno producido por el reflejo producido por las superficies cubiertas de hielo/nieve pueden llevar a valores instantáneos de 2000 W/m^2 o más (solo en promedio instantáneo, no de media hora). Cabe recalcar que cuando se acumula nieve en la parte superior del sensor las mediciones pueden ser atenuadas o perturbadas, por tanto, el albedo puede exceder el valor de 0.9; entonces es necesario corregir SW_{inc} asumiendo un albedo máximo de 0.9, que da: $SW_{inc} = SW_{ref} / 0,9$ (Ec. 4.1) (Delachaux, 2005).

Radiación de onda larga incidente (LW_{atm} en W/m^2) y emitida por la superficie (LW_{surf} en W/m^2)

Estas radiaciones corresponden a longitudes de onda larga emitidas por la atmósfera y la superficie del suelo. En general, el balance de longitudes de onda larga, es decir, $LW_{atm} - LW_{surf}$, es negativo, lo que significa que la superficie emite más energía de la que recibe. Los valores teóricamente posibles de LW_{atm} se encuentran entre 180 W/m^2 y 350 W/m^2 ; y de LW_{surf} entre 250 W/m^2 y 500 W/m^2 , si existen valores fuera de este rango, se corrige con el valor de 315 W/m^2 (Delachaux, 2005), este valor corresponde al punto de fusión del hielo.

Temperatura (T en $^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (RH en %) ventiladas.

Puede suceder que la RH exceda el 100%, porque el sensor no es muy preciso cuando el ambiente se satura, por lo tanto, los valores entre 100 % y 120 % son remplazados con el valor de 100%, mientras que, si existen valores mayores a 120%, el valor de marca como vacío (Delachaux, 2005).

En general, todos los datos registrados de variables meteorológicas están acompañados de una medición de voltaje a la que fue realizada la medición. De esta manera, las medidas registradas con un voltaje de operación por debajo del

especificado por el fabricante (11.2 V por lo general) son también marcadas como vacíos (Delachaux, 2005).

4.1.3 DATOS DE CAUDALES

En esta sección se realizó una revisión del tratamiento de datos de caudales de acuerdo a Loyo (2011).

Dado que los cuadales no pueden ser medidos constantemente a pasos de tiempo cortos como un flujo; lo que se registra como alternativa son mediciones de altura del nivel del agua con limnógrafos automáticos, mediante una lectura de presión realizada por dicho sensor, ubicado en el fondo del vertedero. La descarga de datos es manual, una vez al mes, de igual manera se toma una lectura de la regleta (Figura 4.3), con la que se realiza correcciones a la serie registrada en caso que la calibración del sensor haya fallado.

El vertedero de la cuenca Los Crespos tiene una forma trapezoidal (Figura 4.3), donde se realizan medidas experimentales de caudal y de altura del nivel del agua, información con la que se construye la curva de descarga o calibración, para obtener caudales a partir de medidas limnigráficas.

FIGURA 4.3: VERTEDERO TRAPEZOIDAL LOS CRESPOS A 4521 M.S.N.M.



Fuente: (Arias, 2010).

La Figura 4.4, muestra la curva de descarga del vertedero trapezoidal, construida a partir de la ecuación (4.2)

$$Q_{Cr} = a(1.32(H + b))^{2.47} + 1.69L^{1.02}(H + b)^{1.47} \quad (4.2)$$

donde:

Q_{Cr} : caudal en el vertedero Los Crespos

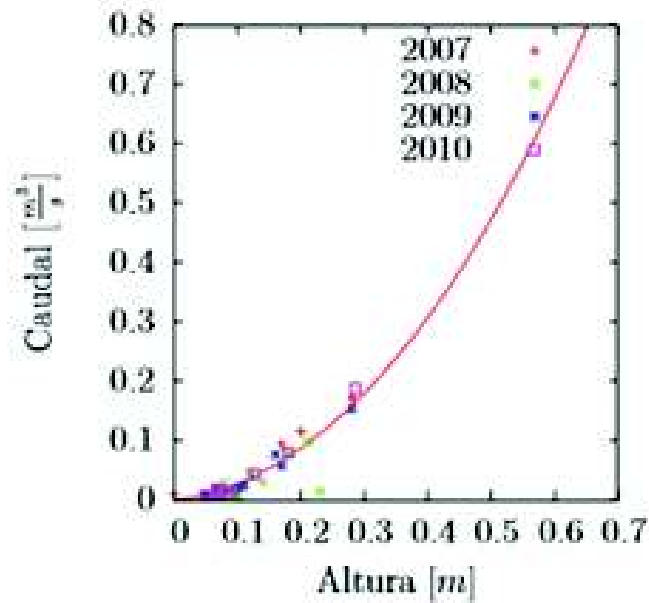
H : altura de agua medida

$$a = 0,964$$

$$b = 0$$

$L = 0.42$, a , b y L son parámetros de ajuste

FIGURA 4.4: CURVA DE DESCARGA LOS CRESPOS



Fuente: (Ruiz, 2015).

4.2 MÉTODO

4.2.1 RADIACIÓN EN CIELO DESPEJADO

Para determinar las propiedades radiactivas de las nubes a partir de mediciones de estaciones meteorológicas en superficie, es necesario comparar las mediciones in situ con la radiación teórica para cielo despejado, en condiciones idénticas.

4.2.1.1 Radiación solar incidente

La media diaria de radiación teórica solar que llega a la capa superior de la tropósfera R_{extra} se calculó a partir de la posición del sitio de estudio respecto al sol y el día del año, mediante el modelo de Favier V. (2004); se conoce que mientras la radiación solar atraviesa la atmósfera, experimenta reflexión, difusión y absorción por efecto de los gases atmosféricos, por tanto para conocer la radiación recibida al nivel de la superficie de la tierra, se multiplicó la radiación extraterrestre por un factor de atenuación atmosférica para cielo despejado T_{clear} (ecuación 4.3).

$$S_{clear} = T_{clear}S_{extra} \quad (W/m^2) \quad (4.3)$$

donde:

S_{clear} : radiación de onda corta incidente en cielo despejado (W/m^2)

T_{clear} : transmisividad en cielo despejado

S_{extra} : radiación teórica de onda corta en el tope de la atmósfera (W/m^2)

Esta atenuación atmosférica depende teóricamente del período del año; sin embargo, como en Ecuador no existen estacionalidades claramente marcadas, se asume que el valor no cambia a lo largo del año. Este coeficiente se calculó por calibración en las mediciones de radiación de onda corta incidente SW_{inc} en días de cielo despejado para cada año durante el período 2005-2015 (lo que también permitió validar o no la hipótesis de una atenuación constante durante el año).

4.2.1.2 Radiación atmosférica incidente

La radiación de onda larga emitida por una atmósfera sin nubes se calculó a partir de su temperatura y de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann, en la cual interviene la emisividad atmosférica en cielo despejado ε_{clear} (ecuación 4.4).

$$L_{clear} = \varepsilon_{clear}\sigma T^4 \quad (W/m^2) \quad (4.4)$$

donde:

L_{clear} : radiación de onda larga incidente en cielo despejado (W/m^2)

ε_{clear} : emisividad atmosférica en cielo despejado

σ : constante de Stefan – Boltzman; $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 K^4)$

T : temperatura (K)

La emisividad atmosférica en cielo despejado ε_{clear} se puede conocer precisamente a partir de los perfiles verticales de temperatura y presión de vapor de agua, pero en el presente estudio únicamente se dispone de mediciones a nivel del suelo, por lo tanto ε_{clear} fue calculado a partir de la fórmula de Brutsaert (Brutsaert, 1975), adaptada para la condiciones del glaciar en estudio (ecuación 4.5). Varias parametrizaciones a partir de mediciones de temperatura y humedad, en el suelo se han propuesto y se ha comprobado que esta formulación demuestra ser una de las más cercanas a las observaciones; por ejemplo (Sedlar & Hock, 2009) sobre un glaciar sueco y (Lhomme et al., 2007) en el Altiplano Boliviano.

$$\varepsilon_{clear} = C(e/T)^{1/m} \quad (W/m^2) \quad (4.5)$$

donde:

C : coeficiente que depende de los gradientes atmosféricos de temperatura y humedad; así como de condiciones locales

e : presión de vapor (hPa)

T : temperatura (K)

m : coeficiente dado por el nivel de la emisión de una columna de vapor de agua con CO_2 en la atmósfera y tiene un valor igual a 7

La mayor parte de la radiación es emitida por las capas inferiores de la atmósfera (Sicart et al., 2016) , la presión de vapor de agua (e) y la temperatura (T) se tomaron a 1 metro de altura medido desde el suelo; el coeficiente de integración (C) depende de los gradientes atmosféricos de temperatura y humedad, que a su vez dependen de las condiciones locales; y el valor tomado fue $C=1,24$, valor aplicable para una atmósfera “Estándar” en latitudes medias. Por lo tanto, este coeficiente debe adaptarse a las condiciones específicas del sitio (altitud alta). Se procedió a una calibración mediante el seguimiento de la emisividad atmosférica medida en función de e/T ; variando y habiendo identificado días de cielo despejado, la curva teórica se puede calibrar "visualmente".

4.2.2 ÍNDICES DE LAS PROPIEDADES RADIATIVAS DE LAS NUBES

4.2.2.1 Índice de transmisividad y emisividad

Los índices de propiedades radiativas F y Tn representan la relación entre la radiación incidente medida y la radiación incidente teórica en cielo despejado, para longitudes de onda corta y larga, respectivamente. El factor de emisión infrarroja de nubes F y el factor de transmisividad de nubes a la luz solar Tn se calcularon como se muestra a continuación (ecuaciones 4.6 y 4.7).

$$F = \frac{LW_{atm}}{L_{clear}} \quad (4.6)$$

$$Tn = \frac{SW_{inc}}{S_{clear}} \quad (4.7)$$

donde:

F : factor de emisión de nubes

Tn : factor de transmisividad de onda corta

LW_{atm} : radiación de onda larga incidente medida (W/m^2)

L_{clear} : radiación de onda larga incidente en cielo despejado (W/m^2)

SW_{inc} : radiación de onda corta incidente medida (W/m^2)

S_{clear} : radiación de onda corta incidente en cielo despejado (W/m^2)

En definitiva, los flujos solares y atmosféricos incidentes se expresan en función de los índices F y Tn según las ecuaciones 4.8 y 4.9.

$$SW_{inc} = Tn * S_{clear} = Tn * T_{clear} * S_{extra} \quad (4.8)$$

$$LW_{atm} = F * L_{clear} = F * \varepsilon_{clear} * \sigma * T^4 \quad (4.9)$$

Estos dos índices (emisividad y transmisividad) corresponden a las propiedades intrínsecas de las nubes. A fin de cuantificar su influencia global sobre la radiación incidente.

4.2.2.2 Forzamiento radiativo de las nubes

Para cuantificar la influencia global de las nubes sobre la radiación incidente, se introdujo el término forzamiento radiativo de las nubes sobre los flujos incidentes $CF \downarrow$, el cual corresponde a la variación de radiación incidente total $R \downarrow$ (radiaciones de onda corta y larga) causada por las nubes; esto es entonces la diferencia entre el flujo incidente total medido y el flujo incidente total teórico para cielo despejado, expresado en $W.m^{-2}$ (ecuación 4.10).

$$CF \downarrow = R \downarrow - R \downarrow_{clear} = (SW_{inc} - S_{clear}) + (LW_{atm} - L_{clear}) \quad (4.10)$$

donde:

$CF \downarrow$: forzamiento radiativo de la nubes

$R \downarrow$: radiación neta medida (W/m^2)

$R \downarrow_{clear}$: radiación neta en cielo despejado (W/m^2)

4.2.2.3 Índice de nubosidad

El índice de nubosidad IN , indica la cantidad de nubes presentes en el cielo, para clasificar los días en: despejados, semi cubiertos o nublados. El IN fue calculado a partir de la diferencia entre los factores de emisividad y transmisividad (ecuación 4.11).

$$IN = F - Tn \quad (4.11)$$

donde:

IN: índice de nubosidad

F: factor de emisión de nubes

Tn: factor de trasmisividad de onda corta

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 RESULTADOS

5.1.1 EFECTO DE LAS NUBES SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR

El objetivo de este trabajo es determinar los efectos de las nubes sobre la radiación solar de onda corta incidente y sobre el flujo de onda larga emitido por la atmósfera; para luego analizar su efecto sobre la fusión del glaciar, el balance de masa y los caudales generados por el aporte glaciar.

5.1.2 PARAMETRIZACIÓN DE LAS RADIACIONES EN CIELO DESPEJADO

La parametrización de la radiación de onda corta para un cielo despejado fue realizada utilizando mediciones de la estación meteorológica (radiaciones de onda corta y larga), para encontrar los coeficientes que permiten calibrar las fórmulas de acuerdo al clima del glaciar Antisana.

El trazo del ciclo anual de radiación solar incidente (en promedios diarios) se realizó para cada año; el coeficiente de atenuación T_{clear} se calibra de manera que la curva de la radiación solar en cielo despejado S_{clear} coincida con los puntos máximos de la curva de SW_{inc} donde los días son despejados. La Figura 5.1, presenta un ejemplo del ajuste de T_{clear} para el año 2010, se obtuvo un $T_{clear} = 0.92$. Además, se puede observar la existencia de una cantidad mayor de días despejados en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, en comparación con los demás meses del año.

La calibración de T_{clear} fue realizada para todos los años del período de estudio (2005-2015). Los valores encontrados varían entre 0.73 y 0.93; y se muestran en la Tabla 5.1.

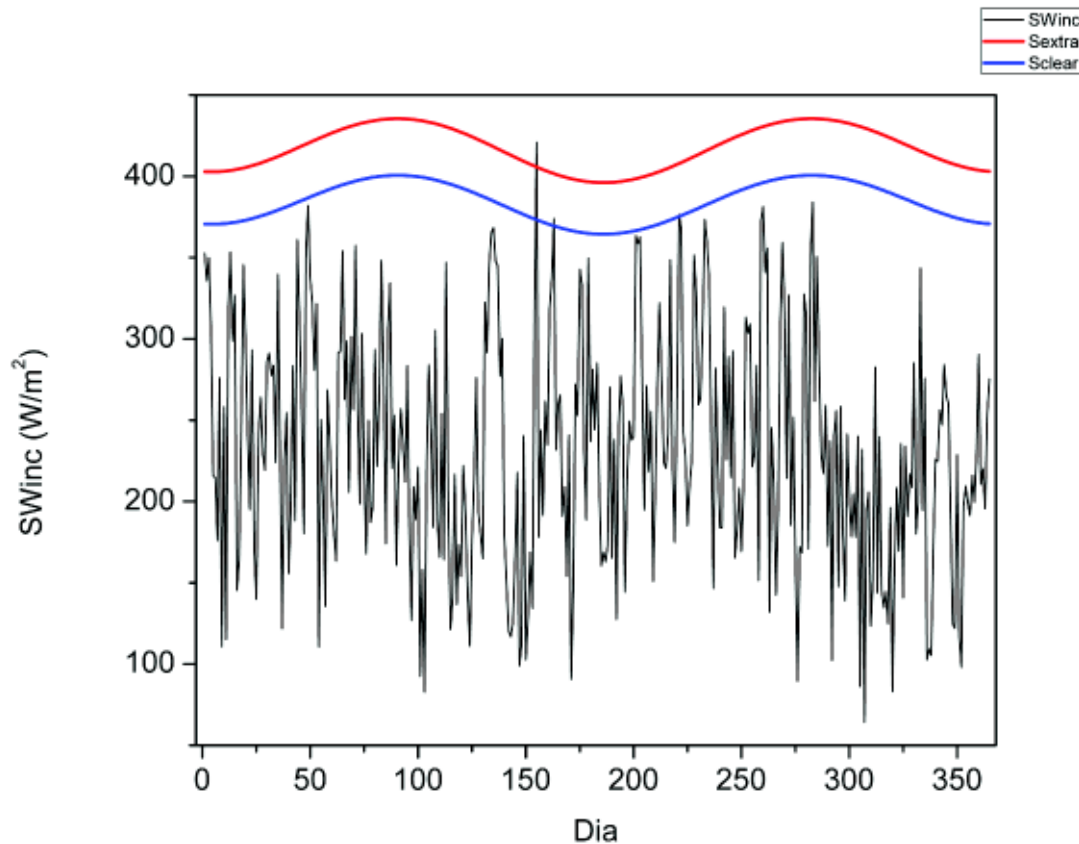
Cabe recalcar que existen días en los que SW_{inc} es mayor a S_{clear} , pero estos casos fueron verificados anteriormente, porque se conoce que, al graficar la serie de datos

de un día despejado, esta es una campana perfecta, lo cual no ocurrió en estos días “atípicos”.

TABLA 5.1: VALORES CALIBRADOS DE T_{clear} Y C PARA CADA AÑO DEL PERIODO DE ESTUDIO 2005-2015

Año	T_{clear}	C
2005	0.73	1.20
2006	0.73	1.20
2007	0.80	1.15
2008	0.81	1.15
2009	0.86	1.00
2010	0.92	1.00
2011	0.93	1.05
2012	0.93	1.05
2013	0.93	1.07
2014	0.82	1.05
2015	0.93	1.00

FIGURA 5.1: RADIACIÓN SOLAR: EXTRATERRESTRE EN CIELO DESPEJADO E INCIDENTE MEDIDA POR LA AWS-ORE, PARA EL AÑO 2010.



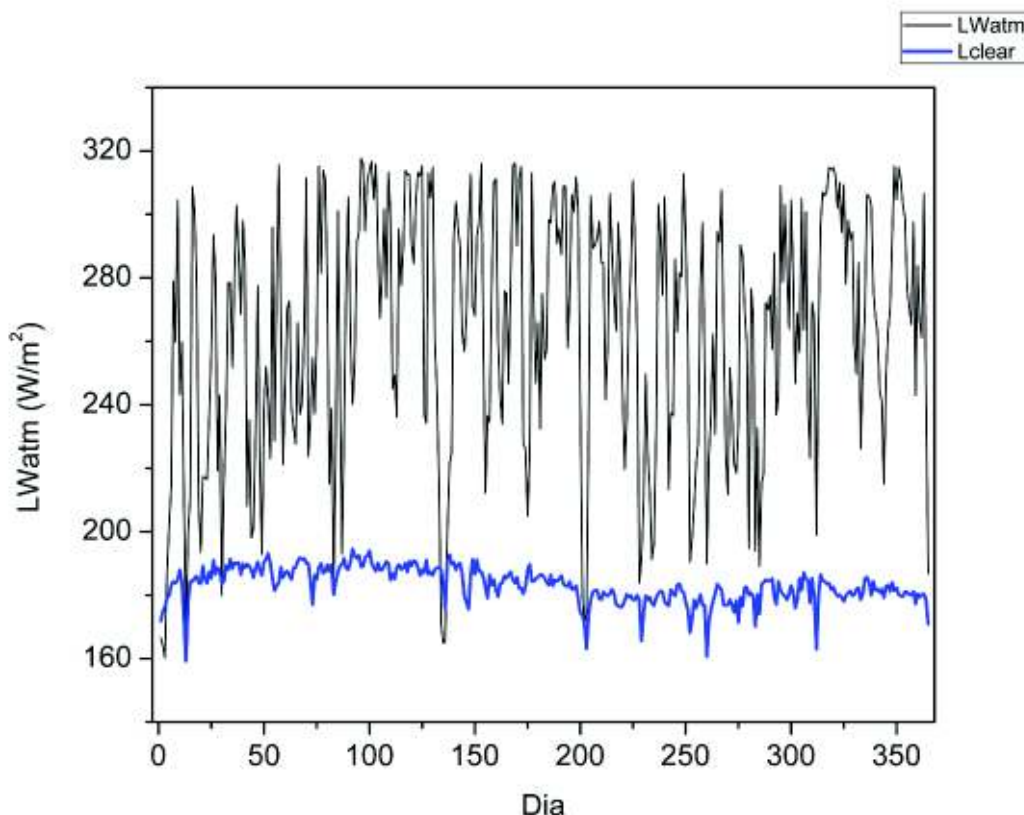
Similar a T_{clear} , la calibración del coeficiente de Brutsaert C para la radiación atmosférica en cielo despejado se ilustra en la Figura 5.2, se calibró de manera que la curva de la radiación atmosférica en cielo despejado L_{clear} (color azul) coincida con los puntos mínimos de la curva de LW_{atm} (color negro), en los puntos más bajos, donde los días son despejados; de esta manera se obtuvo un coeficiente $C=1.20$ para el año 2010.

La parametrización del coeficiente C para el periodo 2005-2010 varía entre 1.00 y 1.20 como se muestra en la Tabla 5.1. Dicho coeficiente depende de las condiciones atmosféricas (baja latitud y gran altitud) del lugar en estudio.

L'homme et al., (2007) adaptaron la fórmula de Brutsaert a varios sitios del Altiplano boliviano, encontrando resultados similares en las medidas. El coeficiente obtenido es 1.18 (contra 1.24 en la formulación inicial),

diferencia que se explica por gradientes de temperatura y humedad mayores a gran altitud.

FIGURA 5.2: RADIACIÓN ATMOSFÉRICA INCIDENTE MEDIDA Y RADIACIÓN TEÓRICA EN CIELO DESPEJADO PARA EL AÑO 2010.

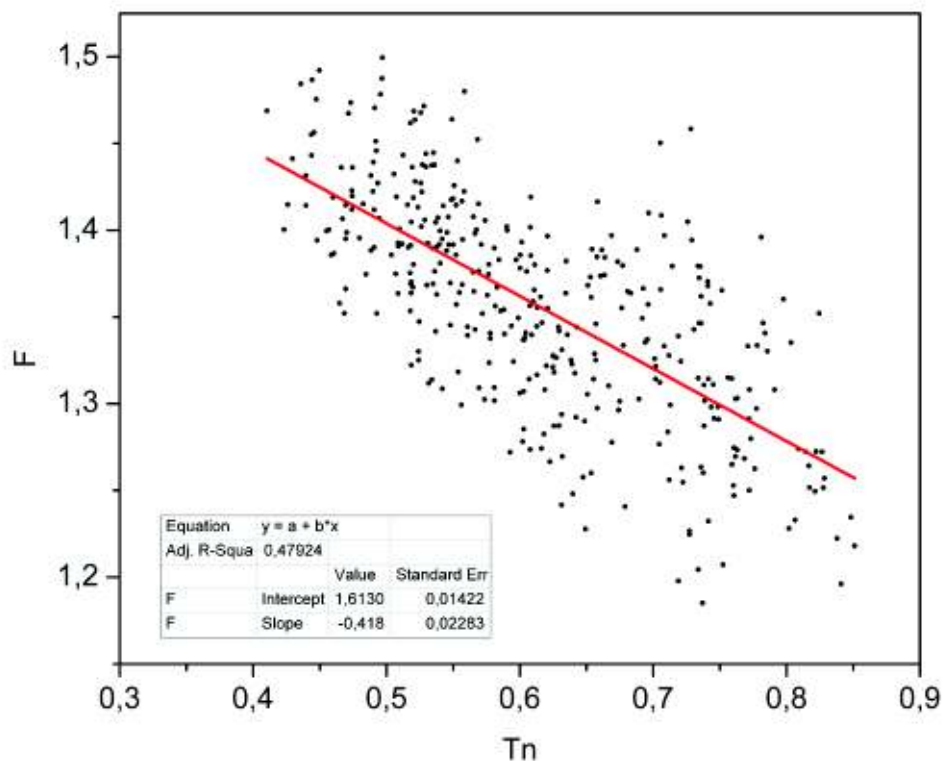


5.1.3 ÍNDICES RADIATIVOS

Los índices de emisividad F y transitividad Tn , nos permitieron conocer el índice de nubosidad IN , definido por la diferencia $F - Tn$ (Sicart et al., 2016).

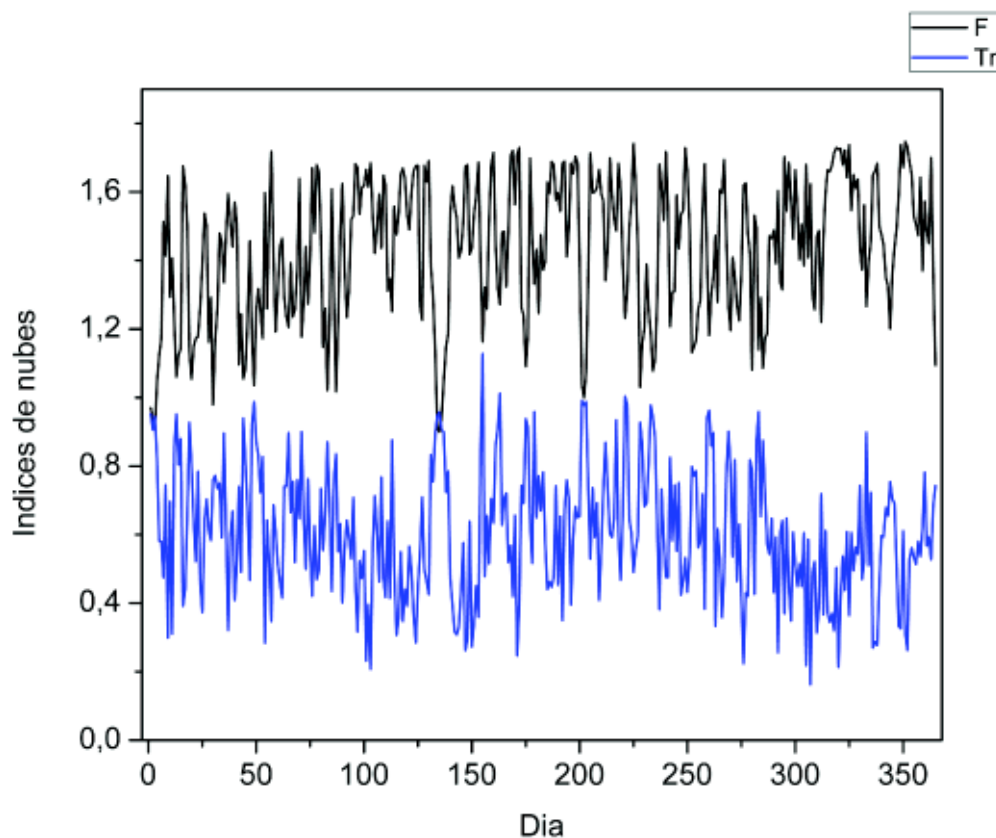
La Figura 5.3, muestra la relación entre Tn y F , con un coeficiente de correlación lineal $R^2=0.48$. Eso nos permite mostrar que en la zona del volcán Antisana la emisión atmosférica y la atenuación de radiación solar, varían en el transcurso del mes y año, esto se debe a que Ecuador no posee una estacionalidad marcada.

FIGURA 5.3: EMISIVIDAD VS TRANSMISIVIDAD, A PARTIR DE VALORES DIARIOS DEL PERIODO 2005-2015



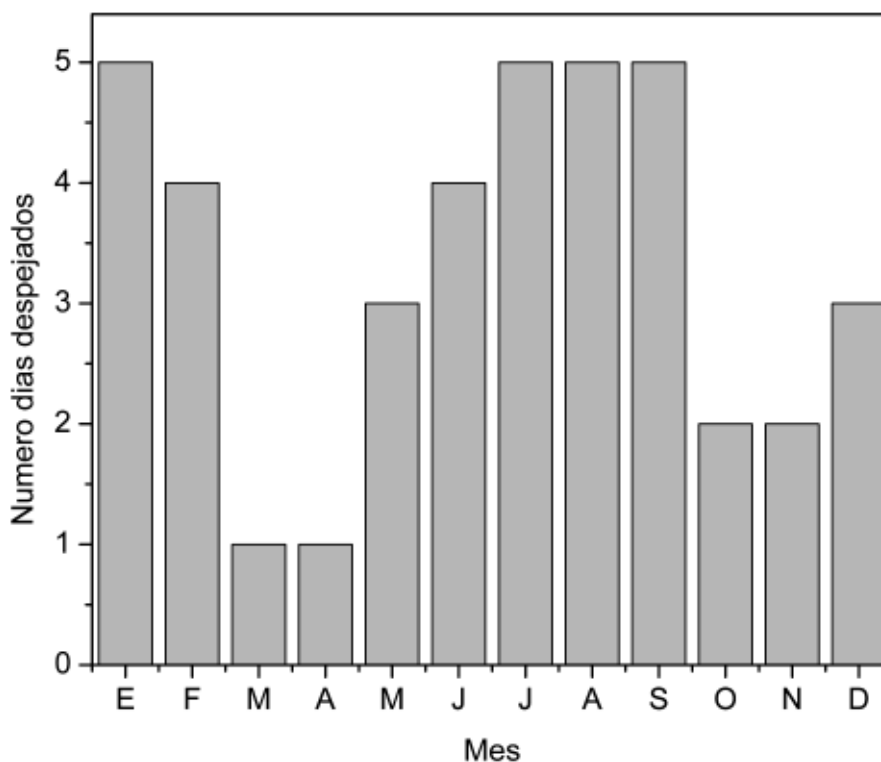
Graficando simultáneamente los índices a paso de tiempo diario, se observa una simetría aparente entre las curvas de los dos índices alrededor del valor 1 (que corresponde a días con cielo despejado), una fuerte emisión atmosférica (F alto) está asociada con una marcada atenuación de la radiación solar (Tn bajo); esta simetría se observa con mayor frecuencia en los meses junio, julio, agosto y septiembre, en comparación con los demás meses del año (Figura 5.4).

FIGURA 5.4: FACTOR DE EMISIÓN INFRARROJA DE LAS NUBES (F) Y FACTOR DE TRANSMISIVIDAD (Tn), AÑO 2010.



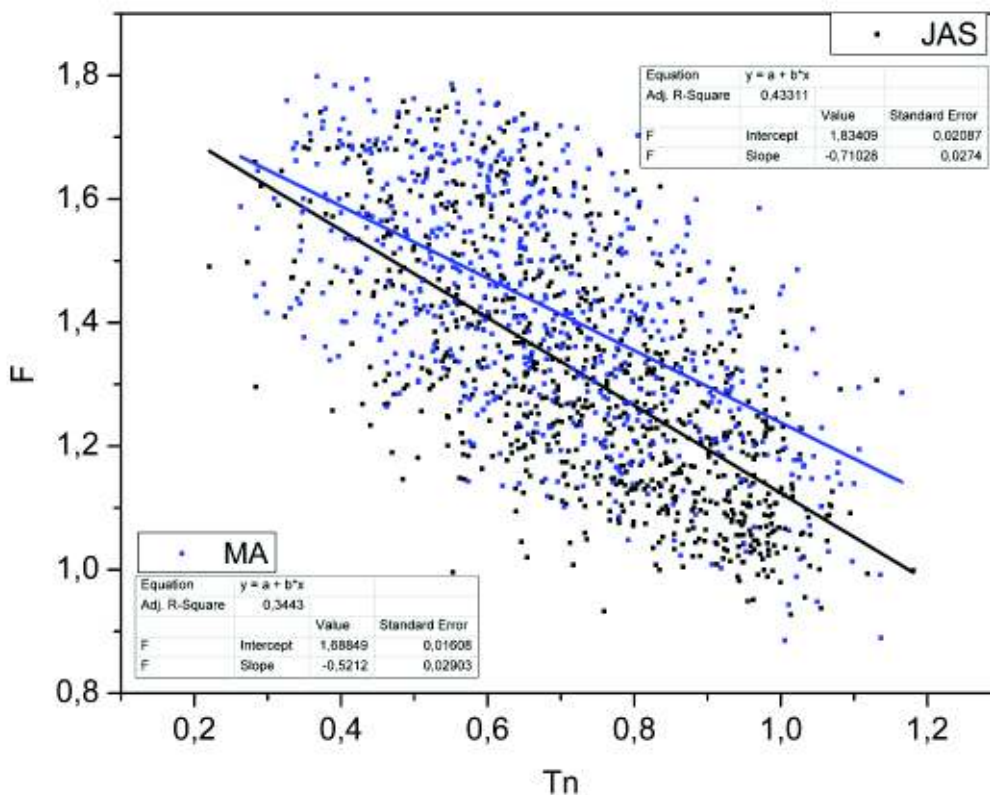
La discusión de los resultados se hace por épocas para tener regímenes climáticos contrastados la primera corresponde a marzo y abril (MA), meses en los cuales existe menor cantidad de días con cielo despejado; y la segunda corresponde a julio, agosto y septiembre (JAS), meses con mayor cantidad de días despejados (figura 5.5). Esta contabilización de días, nos permitió conocer que en promedio existen 50 días despejados al año.

FIGURA 5.5: PROMEDIO MENSUAL DE NÚMERO DE DÍAS DESPEJADOS ($F < 1.15$) PARA EL PERIODO 2005-2015



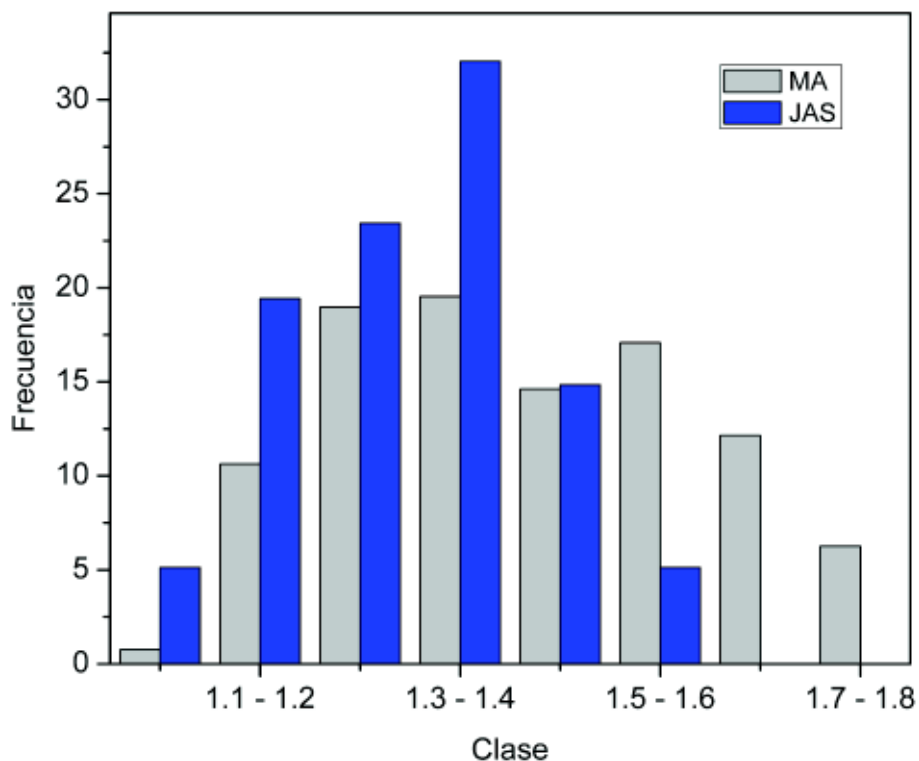
Se calculó el coeficiente de correlación entre los índices F y T_n para cada época, MA y JAS, para observar su evolución en el tiempo. La Figura 5.6 (basada en los mismos datos que la Figura 5.3) muestra las regresiones lineales y las correlaciones asociadas en cada época. Se obtuvo una mayor correlación en la época JAS (mayor cantidad de días despejados) con un $R^2=0,43$; que en la época MA (menos días despejados) con un $R^2=0,34$. La dispersión de puntos en la época MA es más importante, lo que puede explicarse por una mayor cantidad y diversidad de tipos de nubes. También observamos que los puntos de la época JAS son, visualmente más bajos que MA, para la misma atenuación de la radiación solar; el aumento de la radiación atmosférica incidente es más pronunciado en la época MA.

FIGURA 5.6: RELACIÓN ENTRE F Y Tn POR ÉPOCAS, PARA EL PERIODO 2005-2015



Finalmente, la Figura 5.7, muestra la frecuencia de la emisividad por época. En la época MA, F tuvo mayor frecuencia entre los valores 1.2 y 1.4 (aproximadamente el 79% de los días), mientras que, en la época JAS, F tuvo mayor frecuencia entre 1.1 y 1.4 (alrededor del 70% de los días). Con esto podemos evidenciar que el glaciar Antisana no tiene una estacionalidad climática marcada, porque los valores de F son similares para cada época escogida.

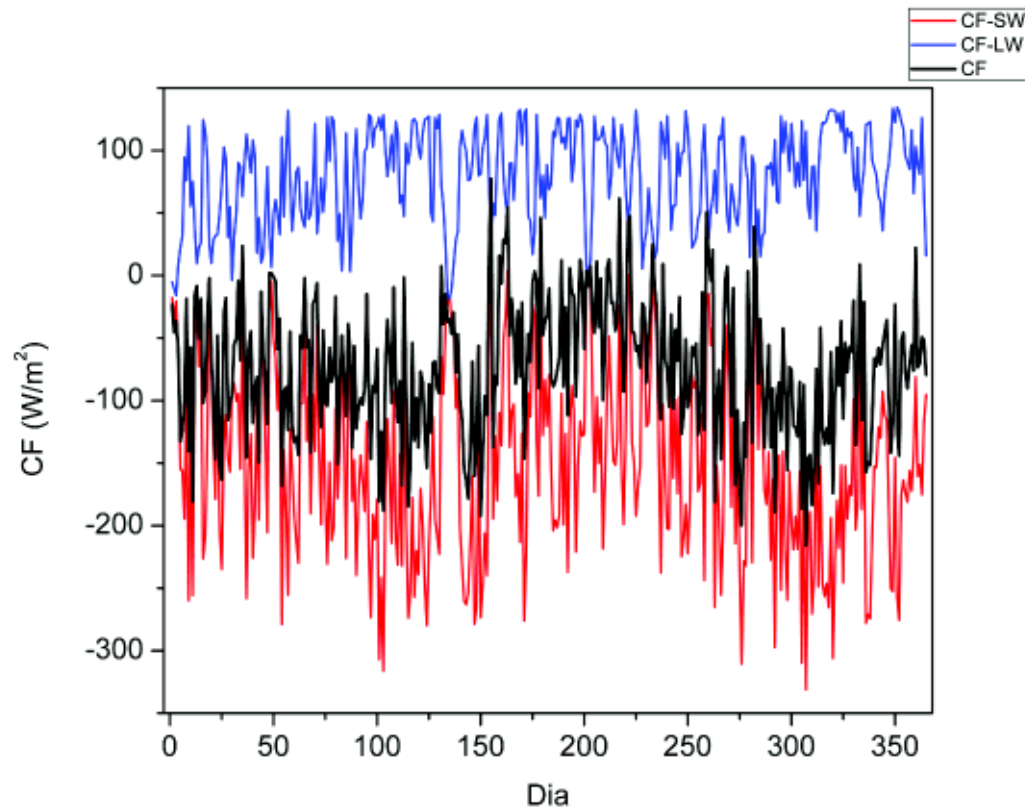
FIGURA 5.7: HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE F PARA CADA ÉPOCA MA (N=527) Y JAS (N=721) PARA EL PERIODO 2005-2015



El estudio de índices de cobertura de nubes proporciona información sobre propiedades de la radiación intrínseca de las nubes, independientemente de la época del año. Se puede tener valores de F y Tn similares en diferentes épocas, lo que se entiende que la cobertura de nubes va a ser similar; por otro lado, la misma nube puede tener un efecto diferente en la radiación incidente dependiendo de la época. Esta es la razón por la cual es relevante estudiar en paralelo la variación en el índice global de radiación incidente causada por las nubes, también llamado forzamiento radiativo, CF (por sus siglas en inglés).

La Figura 5.8, muestra los forzamientos radiativos de onda corta (CF_{sw}) en rojo, de onda larga (CF_{lw}) en azul y forzamiento radiativo global (CF) en negro, a nivel diario para el año 2010.

FIGURA 5.8: FORZAMIENTO RADIATIVO CF, PARA EL AÑO 2010



Una vez realizados todos los cálculos y calibraciones pertinentes a las propiedades radiativas de las nubes para todos los años del periodo de estudio (ver Anexo 2); también se escogió las épocas de estudio (MA y JAS). Se realizará el análisis del efecto de las nubes sobre la radiación, balance de masa, fusión y caudales.

5.2 DISCUSIÓN

5.2.1 EFECTO DE LAS NUBES EN LA RADIACIÓN INCIDENTE

Como habíamos planteado anteriormente, la radiación incidente de onda corta disminuye notoriamente en presencia de nubes. Para esto trazamos las líneas de tendencia de SW_{inc} y LW_{atm} (promedios mensuales) para cada año del periodo de estudio (Figura 5.9).

La Figura 5.9, muestra que las épocas de estudio (MA y JAS) escogidas anteriormente son las apropiadas porque SW_{inc} y LW_{atm} son inversamente proporcionales, con una tendencia más marcada en los meses marzo y abril (MA); y julio, agosto y septiembre (JAS). Cabe recalcar que los promedios mensuales se calcularon a partir de promedios diarios (24 horas del día).

La Tabla 5.2, sintetiza los promedios mensuales de SW_{inc} y LW_{atm} del periodo de estudio; a partir de la cual se obtuvo que en términos energéticos (W/m^2): SW_{inc} en la época MA es 25.55% menor que en JAS y LW_{atm} es 10.77% mayor que en la época JAS. De igual forma los promedios mensuales se calcularon a partir de valores promedio diarios (24 horas).

TABLA 5.2: PROMEDIOS MENSUALES DE SWINC Y LWATM DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)

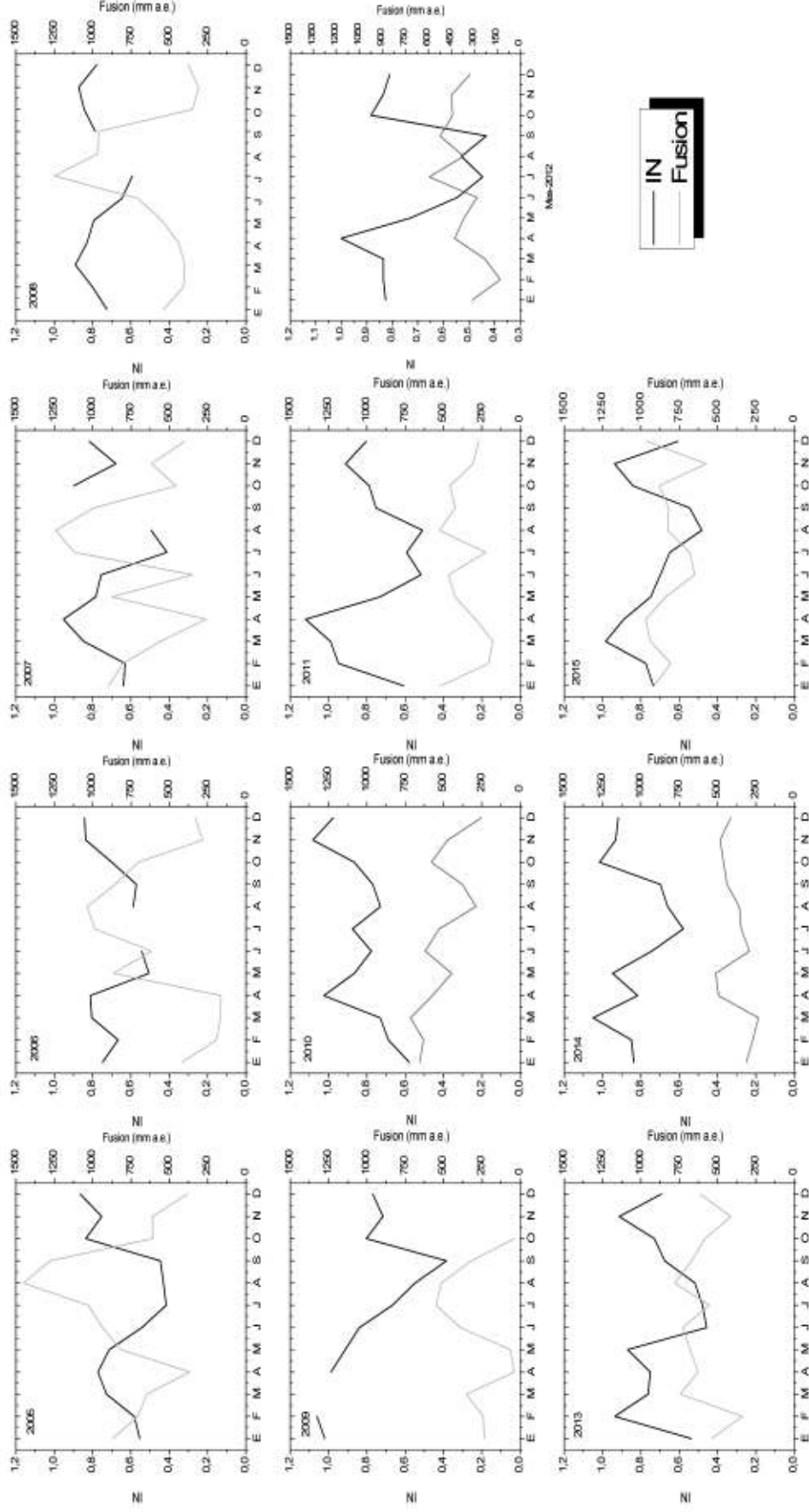
Mes	SWinc (W/m^2)	LWatm (W/m^2)
Ene	209	259
Feb	201	273
Mar	201	278
Abr	190	287
May	216	272
Jun	242	262
Jul	261	256
Ago	265	249
Sep	251	254
Oct	202	270
Nov	185	271
Dic	196	269

5.2.2 EFECTO DE LAS NUBES EN LA FUSIÓN DEL GLACIAR

La presencia de nubes sobre el glaciar cumple un rol importante en la fusión del hielo/nieve. La Figura 5.10, muestra los promedios mensuales del índice de nubosidad y la fusión acumulada mensual del glaciar obtenida mediante la aplicación del BES. Durante los 11 años de estudio (2005-2015) se puede observar que cuando el índice de nubosidad de incrementa, la tasa de fusión disminuye y

viceversa. Este hecho indica que la presencia de nubes disminuye la energía disponible para la fusión, por tanto, disminuye la pérdida de masa glaciar.

FIGURA 5.10: PROMEDIO MENSUAL DEL ÍNDICE DE NUBOSIDAD Y FUSIÓN ACUMULADA MENSUAL ENTRE 4850 Y 4900 M.S.N.M. DEL GLACIAR ANTISANA PARA EL PERÍODO DE ESTUDIO (2005-2015)



Los valores calculados de emisividad, F varían entre 1 y 1.7. Un día nublado presenta un valor de F alto, mientras que un día despejado presenta un F bajo (cercano a 1). Por lo tanto, para mostrar la diferencia de fusión entre un día nublado y un día despejado en las dos épocas (MA y JAS), buscamos el día con mayor y menor F , respectivamente para cada año del periodo de estudio (ver Tabla 5.3).

En días despejados la fusión es mayor en comparación con los días nublados. Al realizar un promedio de la fusión de los días despejados y nublados de la tabla 5.3 se tiene que la fusión del glaciar en un día despejado de la época JAS es 33.21 mm a.e., mientras que, un día despejado de la época MA es 28.68 mm a.e.; valores que evidencian que, a pesar de tener días despejados en las dos épocas, en JAS siempre la fusión será mayor, porque son meses con menor índice de nubosidad donde el glaciar recibe mayor cantidad de radiación de onda corta.

TABLA 5.3: VALORES DIARIOS DE FUSIÓN (mm a.e.) EN UN DÍA DESPEJADO Y UN DÍA NUBLADO PARA CADA ÉPOCA MA Y JAS

Año	Mar-Abr (MA)		Jul-Ago-Sep (JAS)	
	Fusión día nublado	Fusión día despejado	Fusión día nublado	Fusión día despejado
2005	5.14	21.70	4.73	64.06
2006	0.85	16.23	7.34	44.71
2007	1.55	49.69	35.01	76.13
2008	3.01	44.01	18.28	26.26
2009	-	-	21.62	10.88
2010	6.42	32.77	0.01	24.26
2011	13.63	27.98	7.28	22.64
2012	11.08	22.39	3.89	21.60
2013	6.87	21.75	3.00	28.68
2014	2.46	4.32	2.52	16.95
2015	6.62	45.97	0.91	29.18

En la Figura 5.5, se realizó un conteo de días despejados considerando un valor de $F < 1.15$ de acuerdo a Sicart (2016), donde indica que este valor corresponde al percentil 90. Cabe recalcar que los días restantes no necesariamente son nublados, porque en visitas de campo pudimos observar que la presencia de nubes varía a lo

largo del día, es decir, existen horas en las que el cielo es totalmente despejado, horas en las que es completamente nublado y otras donde el cielo es parcialmente nublado. El índice de nubosidad definido por la diferencia $F - Tn$, es mayor cuando el cielo está cubierto de nubes cálidas bajas con alta emisividad de onda larga y/o nubes gruesas, mismas que atenúan fuertemente la radiación de onda corta. Un cielo con presencia de nubes ocurre cuando F es mayor a 1.15, lo que equivale a un $IN > 0.35$ (Sicart et al., 2016). Días con cobertura de nubes “gruesas” fueron identificadas usando el percentil 90 de IN para cada época en los 11 años de estudio, que resultó en $IN > 1.2$ para MA e $IN > 1.0$ para JAS.

Las tablas del Anexo 3, muestran el porcentaje de fusión correspondiente a días despejados, semi cubiertos y nublados, a nivel mensual para cada año del periodo de estudio, clasificados de acuerdo al índice de nubosidad. Consideramos día despejado cuando el valor de IN es menor a 0.35; día semi cubierto cuando IN oscila entre 0.35 y 1.20; y día nublado cuando IN es mayor o igual a 1.20. De esta manera, se evidencia que la mayor cantidad de días a lo largo de año son semi cubiertos, como se observó en visitas al campo. A pesar de existir mayor fusión en la época JAS (figura 5.10); el promedio de fusión para todo el periodo de estudio es mayor en los días con cielo semi cubierto, debido a que la cantidad de estos al año, es mayor (262 días), comparada con la cantidad de días despejados (50 días) y días nublados (53 días). El porcentaje de fusión para todo el periodo de estudio (2005-2015) para días despejados, semi cubiertos y nublados son: 19.27%, 69.91% y 10.82%, respectivamente (ver Tabla 5.4).

TABLA 5.4: PORCENTAJES PROMEDIOS DE FUSIÓN EN DÍAS DESPEJADOS, SEMI CUBIERTOS Y NUBLADOS, PARA EL PERÍODO DE ESTUDIO (2005-2015)

Mes	% de fusión		
	Días despejados	Días semi cubiertos	Días nublados
Ene	10.54	80.46	9.00
Feb	7.13	85.68	7.19
Mar	2.49	76.94	20.57
Abr	1.58	87.22	11.19
May	10.62	79.21	10.17
Jun	15.11	80.70	4.19
Jul	19.31	65.53	15.16
Ago	17.07	67.16	15.76
Sep	13.45	70.35	16.21
Oct	1.98	91.05	6.98
Nov	1.86	89.87	8.27
Dic	2.19	92.71	5.10
Promedio	8.61	80.57	10.82

5.2.3 EFECTO DE LAS NUBES EN EL BALANCE DE MASA

Los datos de balance de masa, BM, disponibles para el periodo 2005-2012, son valores mensuales calculados a partir de mediciones de balizas ubicadas en el glaciar 15 del volcán Antisana, entre los 4850 y 4900 m.s.n.m., en la zona de ablación. En el glaciar 15 la ablación es muy variable a nivel anual (Basantes, 2015) y mensual (ver Figura 5.11), por lo tanto a lo largo del año no se puede obtener una estacionalidad marcada, pero pudimos separarla de acuerdo a su evolución. Enero y febrero son marcados por una ablación moderada. Entre marzo y mayo la variabilidad es alta, porque la ablación puede pasar de valores cercanos a cero a valores fuertemente negativos, como es el caso de abril. En junio y julio la ablación es moderada y poco variable. En agosto la ablación disminuye. Septiembre es el mes con ablación fuertemente negativa. Finalmente, la ablación disminuye regularmente de octubre a diciembre (ver Figura 5.12).

FIGURA 5.11: BALANCE DE MASA MENSUAL (4850-4900 DE ALTITUD) ENTRE ENERO 2005 Y DICIEMBRE 2012 E ÍNDICE DE NUBOSIDAD (PROMEDIO MENSUAL)

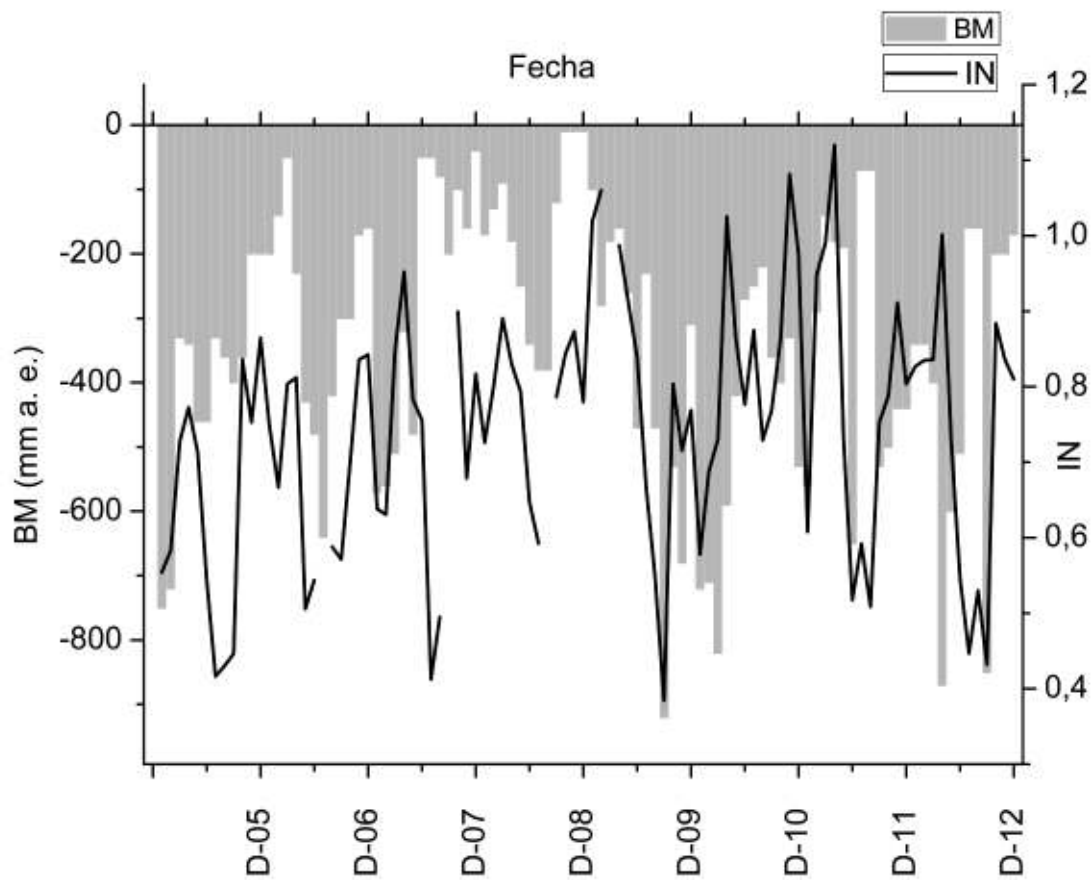
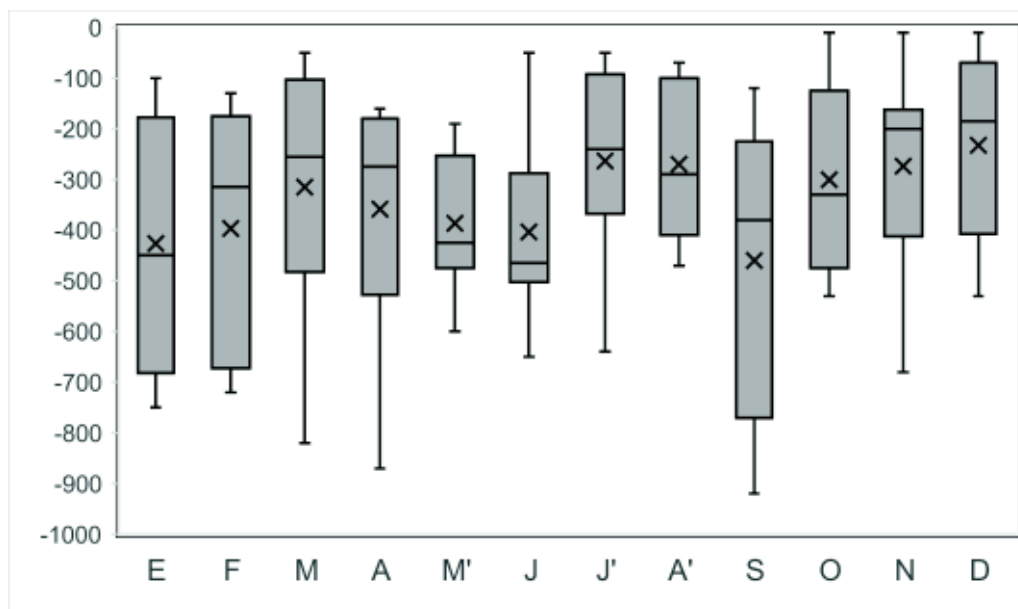


FIGURA 5.12: PROMEDIO MENSUAL DEL BALANCE DE MASA PARA EL PERIODO ENERO 2005 – DICIEMBRE 2012



La tabla 5.5, muestra el coeficiente de correlación de Pearson, entre los valores mensuales del balance de masa y el índice de nubosidad, la correlación varía de valores muy bajos de 0.01 en el año 2012 a valores altos de 0.82 en los años 2006 y 2008. La variación de esta correlación puede deberse a eventos EL Niño y La Niña. Cuando un año es marcado por un evento La Niña (año 2008) la cobertura de nubes es permanente y homogénea, entonces la correlación entre BM e IN es alta, mientras que, en un año marcado por un evento EL Niño (año 2012), la cobertura de nubes disminuye y/o son dispersas, entonces esto provoca que la correlación entre las dos variables sea baja.

TABLA 5.5: CORRELACIÓN ENTRE VALORES MENSUALES DE BALANCE DE MASA E ÍNDICE DE NUBOSIDAD PARA CADA AÑO ENTRE 2005 Y 2012

Año	Valor de R entre BM e IN
2005	0.38
2006	0.82
2007	0.16
2008	0.82
2009	0.77
2010	0.32
2011	0.19
2012	0.01

Posiblemente esta correlación puede mejorar si se la realiza con valores de BM a paso de tiempo menor (ej. diario), trabajo que está fuera de alcance de este estudio.

5.2.3.1 Relación del balance de masa y ENSO

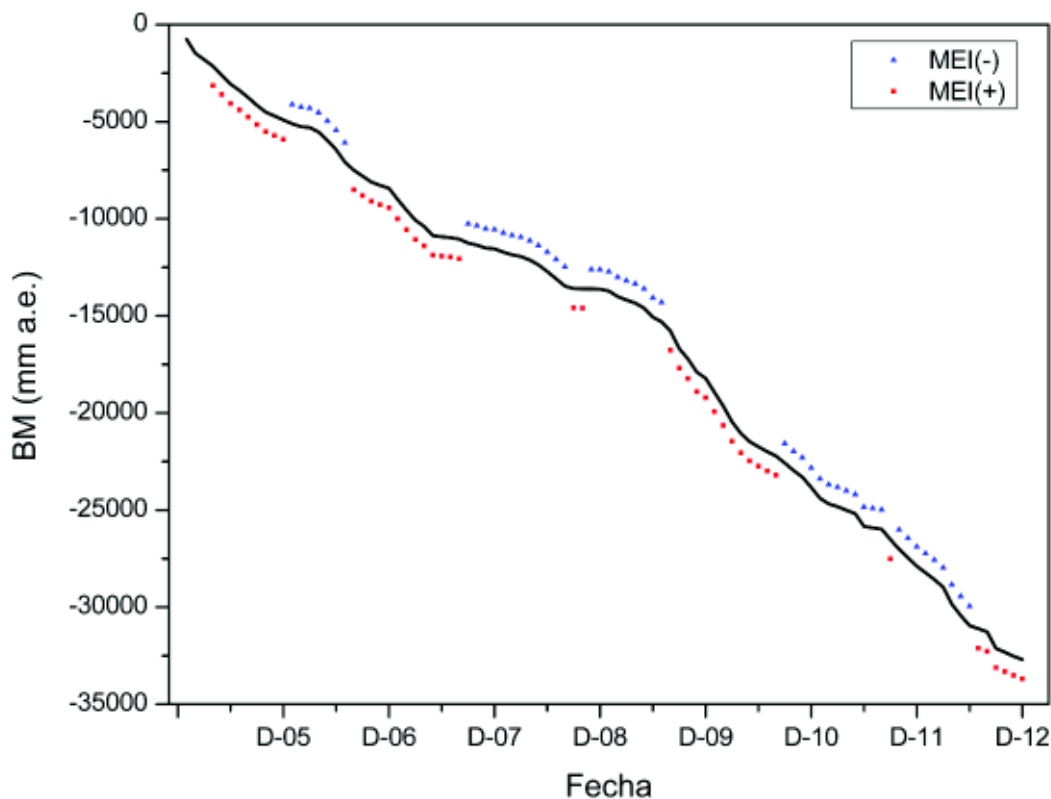
Durante el periodo 2005 y 2012, el balance de masa a 4850 m.s.n.m. es muy variable. Las fases de fuerte ablación fueron observadas durante el año 2005, mitad del año 2007, mitad del año 2009, año 2010 y año 2012, esto se determinó a partir del coeficiente MEI, donde los valores positivos corresponden a eventos El Niño y valores negativos a eventos La Niña. Cabe recalcar que estos valores fueron

desfasados tres meses, porque los efectos de un evento El Niño sobre los Andes se perciben tres meses después de su ocurrencia en el Pacífico (Francou et al., 2004).

El BM del año 2005 es el más negativo (-3103.33 mm a.e. valor acumulado), año que estuvo bajo los efectos de un evento El Niño. El segundo valor fuerte de ablación se produjo en el año 2012 (-2862.50 mm a.e., valor acumulado), de igual manera, fue un año con presencia del fenómeno de El Niño.

Las fases caliente y fría inducen situaciones opuestas. Las anomalías de balance de masa fuertemente negativas durante la situación de tipo El Niño se oponen a las anomalías positivas de las situaciones de tipo La Niña (Francou & Pouyand, 2004). Es importante observar que las situaciones neutrales están más cerca a situaciones La Niña, pero no reflejan un cambio marcado (ver Figura 5.13).

FIGURA 5.13: BALANCE DE MASA ACUMULADO DE ENERO 2005 A DICIEMBRE 2012, EVENTOS EL NIÑO (EN ROJO) Y EVENTOS LA NIÑA (EN AZUL)



5.2.4 EFECTO DE LAS NUBES EN EL CAUDAL

La discusión de esta sección se realizó a partir de valores de caudal, calculados a partir de mediciones limnigráficas en la estación Los Crespos del volcán Antisana. Los caudales fueron promediados a nivel diario con el fin de poder encontrar el efecto de la presencia de nubes sobre los mismos.

Al graficar el valor de caudal promedio diario y el índice de nubosidad en el transcurso del año (ver Figura 5.14), observamos que no existe una relación. Para confirmar dicha inexistencia de correlación, calculamos el valor de R para cada año del período de estudio, teniendo valores entre 0.12 y 0.36, cifras bajas como para establecer la existencia de una correlación entre las dos variables (ver Tabla 5.6).

FIGURA 5.14: EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN DEL CAUDAL PROMEDIO E ÍNDICE DE NUBOSIDAD A PASO DE TIEMPO DIARIO, PARA EL AÑO 2005

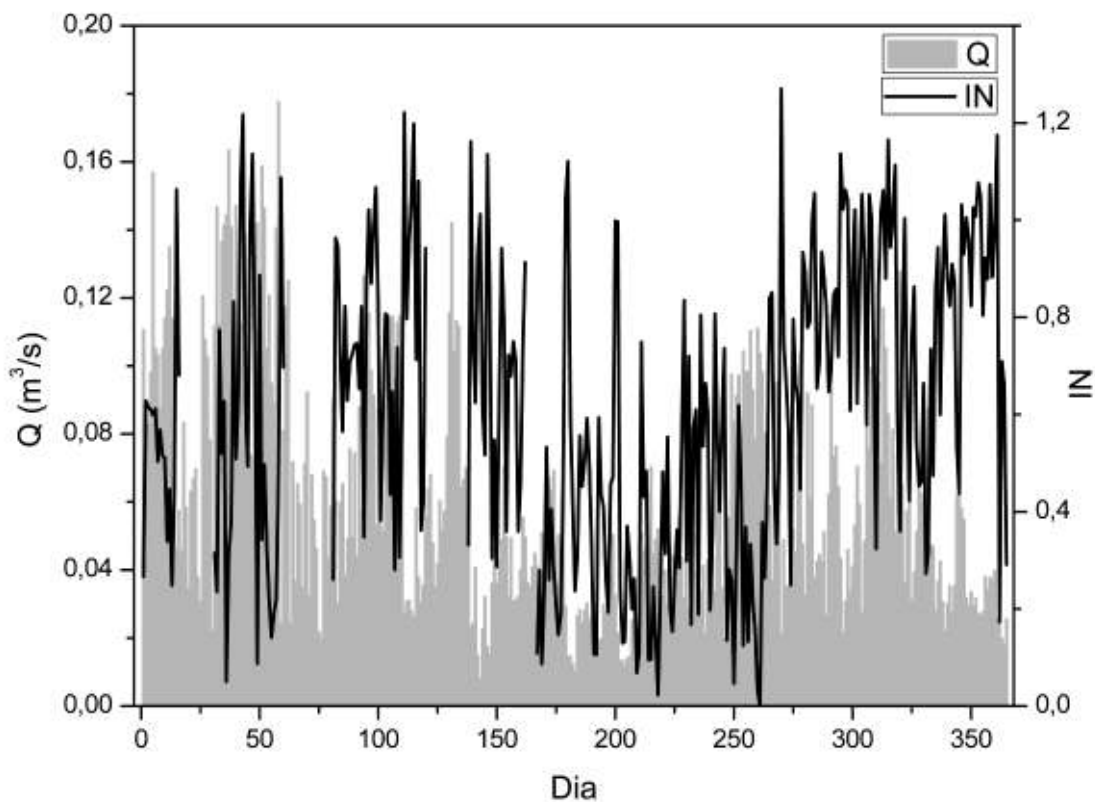


TABLA 5.6: RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE PROMEDIOS DIARIOS DEL CAUDAL Y EL ÍNDICE DE NUBOSIDAD, PARA CADA AÑO DEL PERÍODO DE ESTUDIO

Año	Valor de R entre Q e IN
2005	0.20
2006	0.36
2007	0.26
2008	0.16
2009	0.26
2010	0.16
2011	0.36
2012	0.23
2013	0.13
2014	0.12
2015	0.15

Para evaluar el efecto de las nubes sobre el caudal, se aplicó el mismo procedimiento realizado para el análisis de la fusión. Contabilizamos el porcentaje de caudal que corresponde a días despejados, semi cubiertos y nublados (ver Anexo 4). Obtuvimos que el porcentaje de caudal para todo el periodo de estudio (2005-2015) es: 15.61% para días despejados, 71.73% para días semi cubiertos y 12.96 para días nublados (ver Tabla 5.7).

TABLA 5.7: PORCENTAJES PROMEDIOS DE CAUDAL EN DÍAS DESPEJADOS, SEMI CUBIERTOS Y NUBLADOS, PARA EL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)

Mes	% de caudal		
	Días despejados	Días semi cubiertos	Días nublados
Ene	14.78	73.98	11.24
Feb	11.44	78.48	10.08
Mar	6.56	68.62	24.82
Abr	3.91	78.85	17.24
May	14.69	70.82	14.49
Jun	23.61	71.72	4.67
Jul	34.99	48.35	16.66
Ago	26.84	55.79	17.37
Sep	22.13	61.00	16.88
Oct	9.29	83.62	7.09
Nov	7.54	82.49	9.97
Dic	11.61	83.41	4.98
Promedio (2005-2015)	15.61	71.43	12.96

Si realizamos un promedio de caudal en 25 días, para cada tipo de cobertura de nubes (días despejados, semi cubiertos y nublados) en los 11 años del periodo de estudio; se entendería que, a menor *IN*, mayor caudal; pero la tabla 5.14 muestra que en algunos años se cumple, pero en otros no. La razón de este comportamiento diferente entre un año y otro, efectivamente se debe a la presencia de nubes, porque en días semi cubiertos, existen nubes de precipitación, las cuales aportan agua a toda la cuenca hidrográfica, entonces el caudal es mayor. O puede darse el caso que después de un episodio de lluvia, el cielo se despeje, dando lugar a una tasa de fusión mayor, por tanto, la variación del *IN* a lo largo del día, es la razón por la cual los caudales son mayores en días semi cubiertos.

TABLA 5.8: PROMEDIOS ANUALES DE CAUDAL EN 25 DÍAS DESPEJADOS, 25 DÍAS SEMI CUBIERTOS Y 25 DÍAS NUBLADOS, DESDE 2005 HASTA 2014

Año	Promedio del caudal (m ³ /s) en 25 días		
	Despejados	Semi cubiertos	Nublados
2005	0.079	0.110	0.067
2006	0.064	0.052	0.035
2007	0.053	0.083	0.033
2008	0.042	0.056	0.023
2009	0.043	0.044	0.041
2010	0.079	0.076	0.069
2011	0.052	0.050	0.036
2012	0.049	0.034	0.034
2013	0.034	0.034	0.029
2014	0.027	0.036	0.031

Otra de las razones por las que no existe relación entre IN y el caudal, es porque los datos de Q pertenecen al glaciar 12, mientras que, los datos de IN pertenecen al glaciar 15 del volcán Antisana, a pesar de estar en un mismo ecosistema y/o un mismo glaciar, en visitas de campo se observó que mientras en el glaciar 15 el cielo era despejado, el glaciar 12 tenía un cielo nublado o semi cubierto y viceversa. Por tanto, consideramos que el caudal aumenta o disminuye debido a otros factores aparte de la nubosidad, como infiltración, la topografía mismo del glaciar y la precipitación.

5.2.5 BASE DE DATOS

Con los datos mencionados en las secciones 4.1.2, 4.1.3 y 5.1, se construyó una base de datos confiables sobre los componentes de balance radiativo en el volcán Antisana.

En la base de datos constan valores semi horarios de las siguientes variables meteorológicas:

- Radiación incidente y reflejada de onda corta, SW_{inc} y SW_{ref} , respectivamente en (W/m^2).

- Radiación de onda larga emitida por la atmósfera y emitida por la superficie, LW_{atm} y LW_{surf} , respectivamente en (W/m^2) .
- Humedad relativa, HR en (%).
- Velocidad del viento, u en (m/s) .
- Temperatura, T en $(^{\circ}C)$.
- Radiación solar en el tope de la atmósfera, R_{extra} en (W/m^2) .
- Radiación de onda corta en cielo despejado, S_{clear} en (W/m^2) .
- Radiación de onda larga en cielo despejado, L_{clear} en (W/m^2) .
- Índice de emisividad, F (adimensional)
- Índice de transmisividad, Tn (adimensional)
- Índice de nubosidad, IN (adimensional)
- Forzamiento radiativo de onda corta, CF_{sw} en (W/m^2)
- Forzamiento radiativo de onda larga, CF_{lw} en (W/m^2)
- Forzamiento radiativo total, CF en (W/m^2)
- Caudal, Q en (m^3/s) .

Todas las variables meteorológicas a excepción de los datos de caudales fueron medidas por la estación meteorológica automática ORE del Observatorio Glacioclim, instalada en la morrena lateral del glaciar 15 α a 4850 m de altitud. Los datos de caudal pertenecen a la estación limnigráfica Los Crespos (glaciar Antisana 12).

La base de datos meteorológicos y de caudales es para los 11 años del periodo de estudio (2005-2015) y se entrega en un CD junto con el documento escrito.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

Este estudio permitió evaluar las propiedades radiativas de las nubes (transmisividad, emisividad y forzamiento radiativo) presentes en la zona del glaciar Antisana 15. Los datos de base utilizados fueron principalmente la radiación de onda corta y larga medidas en la estación meteorológica ORE instalada en la morrena lateral del glaciar 15α a 4850 m de altitud durante el periodo de enero 2005 a diciembre 2015.

La comparación de las radiaciones medidas con las radiaciones en cielo despejado, previamente parametrizadas según las condiciones climáticas del glaciar Antisana (latitud baja y altura elevada). Se obtuvo que la atenuación de la radiación solar incidente en cielo despejado varía entre 7 % y 27% de la radiación solar extraterrestre, dependiendo de la calibración de T_{clear} en cada año del periodo de estudio. Para la radiación de onda larga emitida por una atmósfera de cielo despejado, la calibración del coeficiente C en la fórmula de Brutsaert varía entre 1.00 y 1.20.

Los índices que representan la relación entre la radiación medida y la radiación en cielo despejado, en longitudes de onda larga y longitudes de onda corta, respectivamente, son el factor de emisión infrarroja de las nubes y la transmisividad de las nubes. Estos dos índices proporcionan información sobre las propiedades radiativas de las nubes, y están correlacionados con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.48$. Un análisis de estos índices diferenciados por temporada MA y JAS tienen un coeficiente de determinación, R^2 de 0.34 y 0.43 respectivamente.

Aunque se demostró que las propiedades radiativas de las nubes varían mucho en el transcurso del día y del año en la zona del volcán Antisana, el hecho es que su forzamiento radiativo sobre la radiación incidente (principalmente la radiación solar) depende más de las condiciones del cielo despejado que de la radiación solar.

Porque la presencia de nubes reduce la radiación de onda corta incidente. En cualquier caso, este forzamiento radiativo en la radiación incidente es sistemáticamente negativo. Los valores del forzamiento radiativo total generalmente varía entre -150 W/m^2 y $+50 \text{ W/m}^2$.

En términos energéticos (W/m^2) se encontró que la radiación incidente de onda corta en la época MA es 25,55 % menor que en JAS y la radiación incidente de onda larga es 10.77% mayor que en JAS, tomando en cuenta que estos porcentajes se calcula a partir de promedios diarios de 24 horas.

A partir del índice de nubosidad se pudo contabilizar los días con cielo despejado, semi cubierto y nublado, teniendo en promedio 52 días, 162 días y 50 días, respectivamente en el año. También se identificó nubes gruesas por medio del percentil 90 del índice de nubosidad, las cuales son nubes cálidas bajas con alta emisividad de onda larga, que atenúan la radiación de onda corta. Se obtuvo que en época MA, valores de IN mayores a 1.20 corresponden a días con nubes gruesas o cúmulos, mientras que, en la época JAS esto ocurre a partir de valor de IN mayores a 1.0.

Con respecto a la fusión se concluye que a pesar de que existe mayor fusión en un día despejado, respecto a un día semi cubierto o nublado; el porcentaje de fusión para todo el periodo de estudio es mayor en los días semi cubiertos (80,57%), frente al porcentaje de días despejados (8,61%) y días nublados (10,82%), esto debido a que los días semi cubiertos son más numerosos durante el año (162 días).

En cuanto al balance de masa se concluye que existe una buena correlación con el índice de nubosidad cuando existe un evento La Niña ya que la nubosidad es permanente y homogénea, mientras que, durante los eventos El Niño, la nubosidad es variable y dispersa por tanto las propiedades radiactivas cambian de manera drástica y provoca una disminución en la relación entre el índice de nubosidad y balance de masa.

Finalmente, la relación existente entre los caudales y el índice de nubosidad es baja, oscila entre 0.12 y 0,36, esto puede deberse a que el estudio de las propiedades radiativas de las nubes se realizó en el glaciar 15, mientras que los datos de caudal pertenecen al glaciar 12, y no siempre la evolución de la cobertura

de nubes es la misma en los dos glaciares. También existen diferencias topográficas de tamaño y de cobertura, entre los dos glaciares, las mismas que afectan directamente los caudales.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

Realizar el mismo estudio de las propiedades radiativas de las nubes con datos meteorológicos medidos en el glaciar Los Crespos (glaciar 12 del volcán Antisana) para saber si el comportamiento es el mismo, porque dado que, la cobertura de nubes sobre el glaciar y en toda la región de los Andes es variable en el transcurso del día, se podrían tener valores de índice de nubosidad diferentes a nivel diario.

Se recomienda realizar la descarga de datos de las estaciones meteorológicas ubicadas sobre la morrena y el glaciar Antisana, con mayor frecuencia, porque existe ocasiones en las que la memoria que almacena llega a su capacidad máxima y, ésta automáticamente empieza a borrar datos antiguos para almacenar los nuevos. También se debe revisar el estado de la batería porque en caso de que esta no disponga de energía suficiente, los datos son erróneos.

De igual manera se recomienda tratar los datos una vez que sean descargados para de esta manera poder detectar anomalías en las mediciones y de ser el caso reparar la estación meteorológica con el fin de que la serie de datos tenga mayor continuidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, M. (2010). *Modelación de crecidas glaciares a distintas escalas de tiempo en los ríos Humboldt y Los Crespos a partir de la meteorología del volcán Antisana*. Escuela Politécnica Nacional.
- Basantes, R. (2015). *Contribution à l'étude de l'évolution des glaciers et du changement climatique dans les Andes équatoriennes depuis les années 1950*. Université Grenoble Alpes.
- Brutsaert, W. (1975). On a derivable formula for longwave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, 11(5), 742–744. <https://doi.org/10.1029/WR011i005p00742>
- Brutsaert, W. (1982). Energy Budget and Related Methods. In *Evaporation into the Atmosphere* (pp. 209–230). Springer, Dordrecht.
- Cogley, J. G., & Adams, W. P. (1998). Mass balance of glaciers other than the ice sheets. *Journal of Glaciology*, 44(147), 315–325.
- Corripio, J. (2002). *Modelling the energy balance of high altitud glacierised basins in the Central Andes*. Univeristy of Edinburgh.
- Cuffey, K., & Paterson, W. (2010). *The Physics of Glaiers* (4th ed.). Elsevier, Massachusetts, U.S.A.: Springer Netherlands.
- Delachaux, F. (2005). *Représentativité de la station météorologique ORE Equateur par rapport à la météo locale du glacier 15 de l' Antizana (0°25'S, 78°09'O), Cordillère Orientale d'Equateur*. Rappor de fin de mission.
- Favier, V., Coudrain, A., Cadier, E., Francou, B., Ayabaca, E., Maisincho, L., ... Wagnon, P. (2008). Evidence of groundwater flow on Antizana ice-covered volcano, Ecuador / Mise en évidence d'écoulements souterrains sur le volcan englacé Antizana, Equateur. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 278–291. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.1.278>

- Favier, V., Wagnon, P., Chazarin, J. P., Maisincho, L., & Coudrain, A. (2004). One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana Glacier 15, Ecuadorian Andes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *109*(18). <https://doi.org/10.1029/2003JD004359>
- Fernández, W., & Ramírez, P. (1991). El Niño Oscilación del Sur y sus Efenctos en Costa Rica. In *Tecnología en Marcha* (pp. 3–10).
- Francou, B., & Pouyand, B. (2004). *Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales*. *Glacioclim*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4220.8164>
- Francou, B., & Pouyaud, B. (2008). Glaciares: ¿ cómo y dónde estudiarlos? *Revista Virtual REDESMA*, *2*(3), 9.
- Francou, B., Ramirez, E., Cáceres, B., & Mendoza, J. (2000). Glacier Evolution in the Tropical Andes during the Last Decades of the 20 th Century: Chacaltaya, Bolivia, and Antizana, Ecuador. *AMBIO A J. Hum. Environ.*, *29*(7), 416–422. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.7.416>
- Francou, B., Ribstein, P., Wagnon, P., Ramirez, E., & Pouyaud, B. (2005). Glaciers of the Tropical Andes: Indicators of Global Climate Variability. In *Global Change and Mountain Regions Advances in Global Change Research Volume 23* (pp. 197–204).
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V., & Cáceres, B. (2004). New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0??28'S. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *109*(18). <https://doi.org/10.1029/2003JD004484>
- Garrat, J. R. (1994). The Atmospheric Boundary Layer. *Earth-Science Reviews*, *37*(1–2), 89–134.
- Garreaud, R. D., & Aceituno, P. (2007). Atmospheric Circulation and Climatic Variability. *The Physical Geography of South America*, 45–59.
- Gualco, L. (2018). *Aplicación de Balance de Energía para Analizar el Forzamiento Atmosférico en la Producción de Caudales en un Glaciar Tropical caso de EStudio: Glaciar 12 del Volcán Antisana*.

- Hastenrath, S. (1981). The glaciation of the Ecuadorian Andes. *Balkema*.
- Hastenrath, S. (1991). *Climate dynamics of the Tropics*. Dordrecht.
- Kaser, G. (2001). Glacier-climate interaction at low latitudes. *Journal of Glaciology*, 47(157), 195–204. <https://doi.org/10.3189/172756501781832296>
- Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press.
- Leonardini, G., Rabatel, A., Soruco, A., Ginot, P., & Ramirez, E. (2012). Apráctica, metodológica y. *REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA*, 21, 6–11.
- Lhomme, J. P., Vacher, J. J., & Rocheteau, A. (2007). Estimating downward long-wave radiation on the Andean Altiplano. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(3–4), 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.04.007>
- Loyo, C. (INAMHI). (2011). *Glaciares del Ecuador: Antisana y Carihuyrazo, Hidrología*. Quito.
- Maisincho, L. (2015a). *Analyse de la fonte glaciaire et nivale dans les Andes tropicales à partir d'un bilan d'énergie: Glacier de l'Antisana, Equateur (0°28'S)*. L'univeristé Grenoble Alpes, Francia.
- Maisincho, L. (2015b). *Analyse de la fonte glaciaire et nivale dans les Andes tropicales à partir d'un bilan d'énergie: Glacier de l'Antisana, Equateur (0°28'S)*.
- Mena, S. (2010). Evolución de la Dinámica de los Esgurrimientos en Zonas de Alta Montaña: Caso del Volcán Antisana.
- NOAA. (2018). Earth System Research Laboratiry. Retrieved from <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>
- Oerlemans, J., & Grisogono, B. (2002). Glacier winds and parameterisation of the related surface heat fluxes. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 54(5), 440–452. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.2002.201398.x>
- Oke, T., & Cleugh, H. (1987). Urban Heat Storage derived as energy blance residuals. *Boundary Layer Meteorology*, 39(3), 233–245.
- Pellicciotti, F., Carengo, M., Helbing, J., & Rimkus, S. (2009). On the role of

- subsurface heat conduction in glacier energy-balance modelling. *Annals of Glaciology*, 50(50), 16–24.
- Philander, S. G. (1985). El Niño and La Niña. *Journal of Atmospheric Sciences*, 42(23), 2652–2662. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<2652:ENALN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<2652:ENALN>2.0.CO;2)
- Rabatel, A. (2005). *Chronologie et interpretation paleoclimatique des fluctuations des glaciers dans les andes de Bolivie (16°S) depuis le maximum du petit age glaciaire (17eme siecle)*. Université Joseph-Fourier - Grenoble I.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Ruiz, J. C. (2015). *Simulación de la hidrología de la cuenca Humboldt del volcán Antisana*.
- Sedlar, J., & Hock, R. (2009). Testing longwave radiation parameterizations under clear and overcast skies at Storglaciären, Sweden. *The Cryosphere*, 3(1), 75–84. <https://doi.org/10.5194/tc-3-75-2009>
- Sicart, J. E., Espinoza, J. C., Quéno, L., & Medina, M. (2016a). Radiative properties of clouds over a tropical Bolivian glacier: seasonal variations and relationship with regional atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 36(8), 3116–3128. <https://doi.org/10.1002/joc.4540>
- Sicart, J. E., Espinoza, J. C., Quéno, L., & Medina, M. (2016b). Radiative properties of clouds over a tropical Bolivian glacier: seasonal variations and relationship with regional atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 36(8), 3116–3128. <https://doi.org/10.1002/joc.4540>
- Sicart, J. E., Hock, R., Ribstein, P., & Chazarin, J. P. (2010). Sky longwave radiation on tropical Andean glaciers: Parameterization and sensitivity to atmospheric variables. *Journal of Glaciology*, 56(199), 854–860. <https://doi.org/10.3189/002214310794457182>

- Singh, V., Singh, P., & Haritashya, U. (2011). *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* (1st ed.).
- Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., Ribstein, P., Berger, T., Sicart, J. E., ... Lejeune, Y. (2009). Mass balance of Glaciar Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. *Annals of Glaciology*, 50(50), 1–8. <https://doi.org/10.3189/172756409787769799>
- Villacís, M. (2008). *Ressources en eau glaciaire dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat: Le cas du volcan Antisana*. L'UNIVERSITE MONTPELLIER II.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3–4), 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
- Wagnon, P. (1999). *Analyse du bilan d'énergie d'un glacier tropical : application a la relation glacier-climat*. Université Joseph Fourier-Grenoble I, Francia.

ANEXOS

ANEXO 1

BASE DE DATOS

La base de datos consta de valores meteorológicos a paso de tiempo semi horario, medidos por la estación meteorológica automática ORE del Observatorio Glacioclim, instalada en la morrena lateral del glaciar Antisana 15α a 4850 m de altitud. Los datos de caudal pertenecen a la estación limnigráfica Los Crespos (glaciar Antisana 12).

Las variables disponibles en la base de datos son: SW_{inc} , SW_{ref} , LW_{atm} , LW_{surf} , HR , u , T , R_{extra} , S_{clear} , L_{clear} , F , Tn , IN , CF_{sw} , CF_{lw} y Q .

A continuación, se muestra un ejemplo de la estructura de la base de datos, pero debido a su gran extensión (11 años) la base de datos completa se encuentra en un CD adjunto al final de este documento.

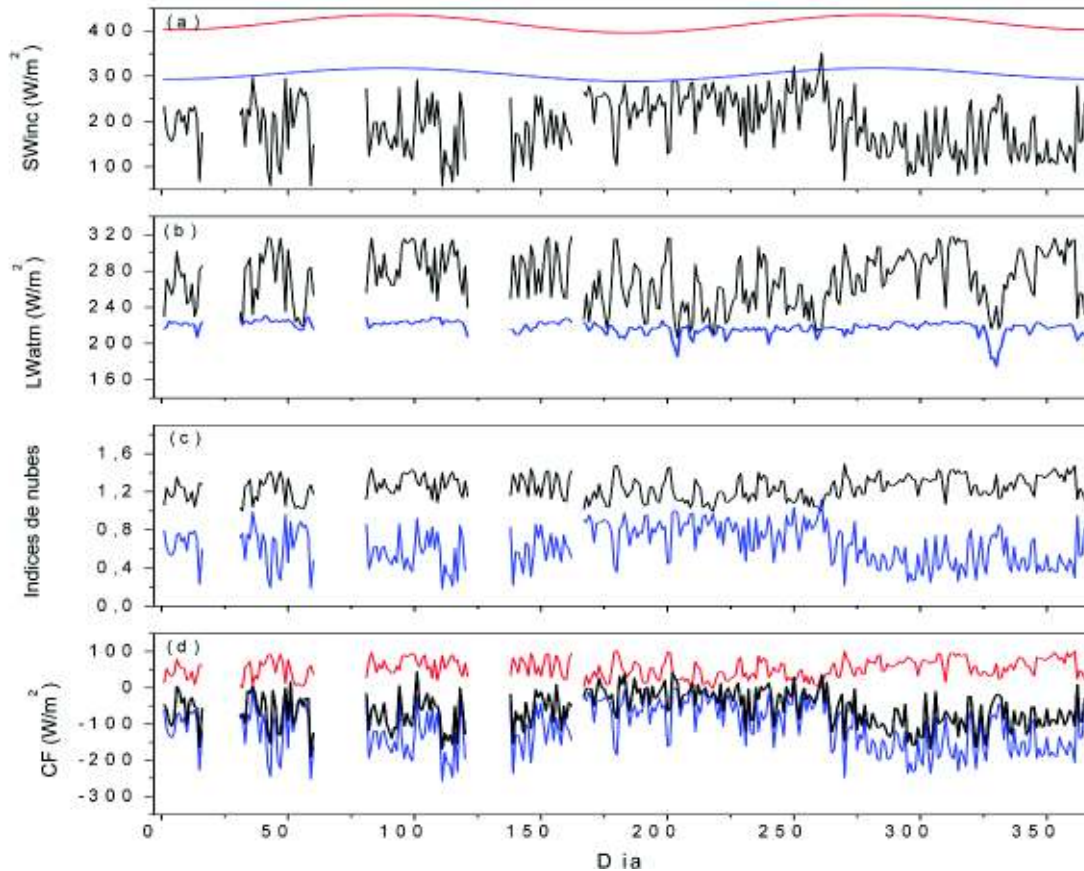
TABLA A1.1: EJEMPLO DE BASE DE DATOS CON VARIABLES DEL BALANCE RADIATIVO, DATOS MEDIDOS POR LA ESTACIÓN ORE ,INNTALADA SOBRE LA MORRENA LATERAL DEL GLACIAR 15 DEL VOLCÁN ANTISNA

Fecha	SWin (W m- 2)	Swout (W m- 2)	LWin (W m- 2)	LWout (W m- 2)	T (°C)	RH (%)	u (m/s)	Rextra	Sclear	Lclear	F	Tn	IN	CFSW	CFLW	CF
1/1/2005	233.70	28.00	229.79	342.34	1.98	63.68	5.54	402.87	294.10	216.55	1.06	0.79	0.27	-60.39	13.24	-47.15
2/1/2005	181.15	23.61	271.39	329.92	0.46	86.71	7.60	402.82	294.06	218.10	1.24	0.62	0.63	-112.90	53.29	-59.61
3/1/2005	162.51	20.71	262.77	331.36	2.33	78.27	4.59	402.78	294.03	224.92	1.17	0.55	0.62	-131.52	37.84	-93.67
4/1/2005	156.44	20.13	253.87	329.27	1.91	77.32	4.29	402.77	294.02	222.27	1.14	0.53	0.61	-137.58	31.60	-105.98
5/1/2005	170.24	22.19	263.97	331.63	2.36	75.81	6.46	402.78	294.03	224.08	1.18	0.58	0.60	-123.78	39.89	-83.89
6/1/2005	218.61	24.01	301.92	324.01	1.09	90.31	7.29	402.81	294.05	222.77	1.36	0.74	0.61	-75.44	79.15	3.71
7/1/2005	225.92	13.79	281.62	323.31	1.24	84.31	6.77	402.86	294.09	221.42	1.27	0.77	0.50	-68.17	60.21	-7.96
8/1/2005	198.04	20.57	273.25	321.02	0.83	86.76	6.13	402.94	294.15	220.06	1.24	0.67	0.57	-96.11	53.19	-42.92
9/1/2005	213.41	11.70	277.25	325.02	1.60	84.59	4.49	403.04	294.22	223.44	1.24	0.73	0.52	-80.81	53.81	-27.00
10/1/2005	171.41	12.74	243.74	325.45	2.13	75.75	2.28	403.16	294.31	222.80	1.09	0.58	0.51	-122.90	20.93	-101.96
11/1/2005	230.41	23.59	246.91	332.73	1.55	76.88	3.72	403.30	294.41	220.12	1.12	0.78	0.34	-64.00	26.79	-37.21
12/1/2005	222.88	23.11	265.91	323.15	1.62	78.19	4.77	403.47	294.53	221.04	1.20	0.76	0.45	-71.65	44.86	-26.79
13/1/2005	233.54	24.85	229.81	333.52	2.34	68.58	3.67	403.65	294.67	220.76	1.04	0.79	0.25	-61.13	9.05	-52.08
14/1/2005	206.19	24.75	239.52	339.56	2.87	40.06	3.26	403.86	294.82	207.11	1.16	0.70	0.46	-88.63	32.41	-56.22
15/1/2005	67.95	7.31	281.22	322.99	0.67	81.79	2.05	404.09	294.99	217.39	1.29	0.23	1.06	-227.04	63.83	-163.21

ANEXO 2

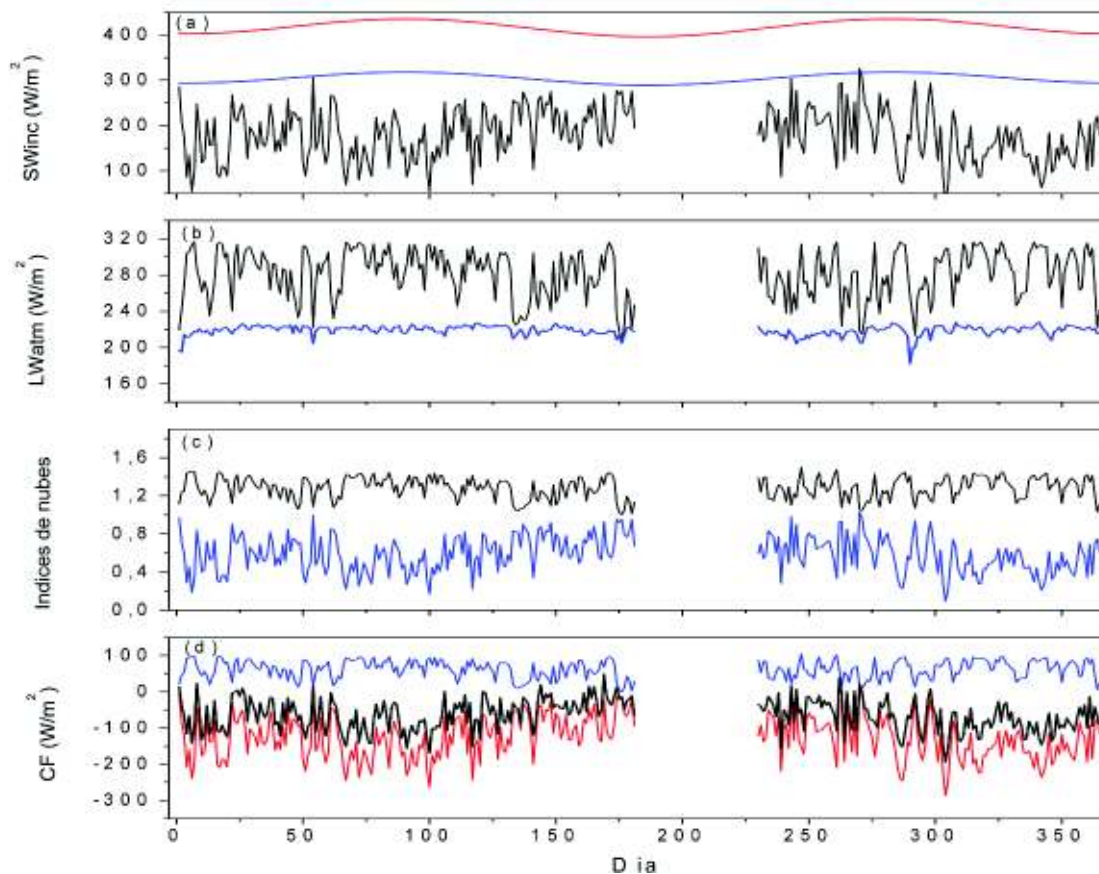
RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR 15 DEL VOLCÁN ANTISANA, PARA CADA AÑO DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015).

FIGURA A2.1: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2005



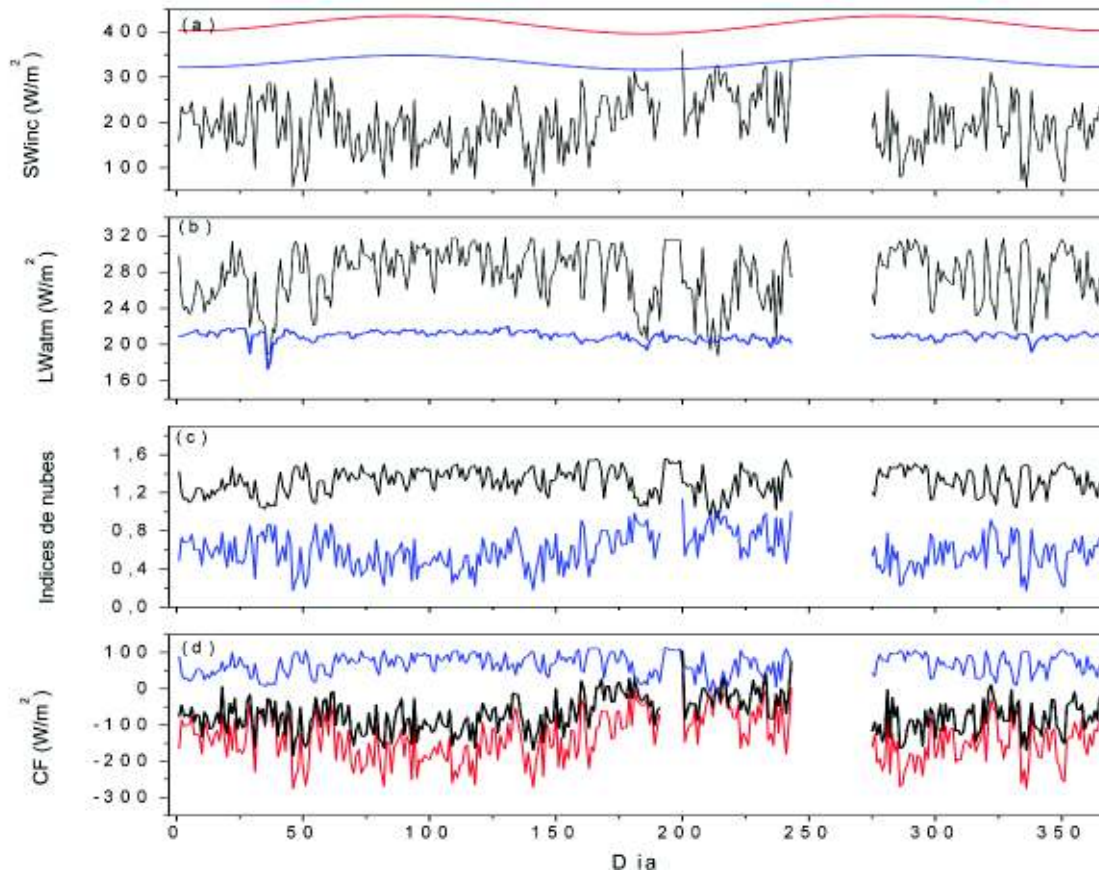
(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (Tn) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2005.

FIGURA A2.2: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2006



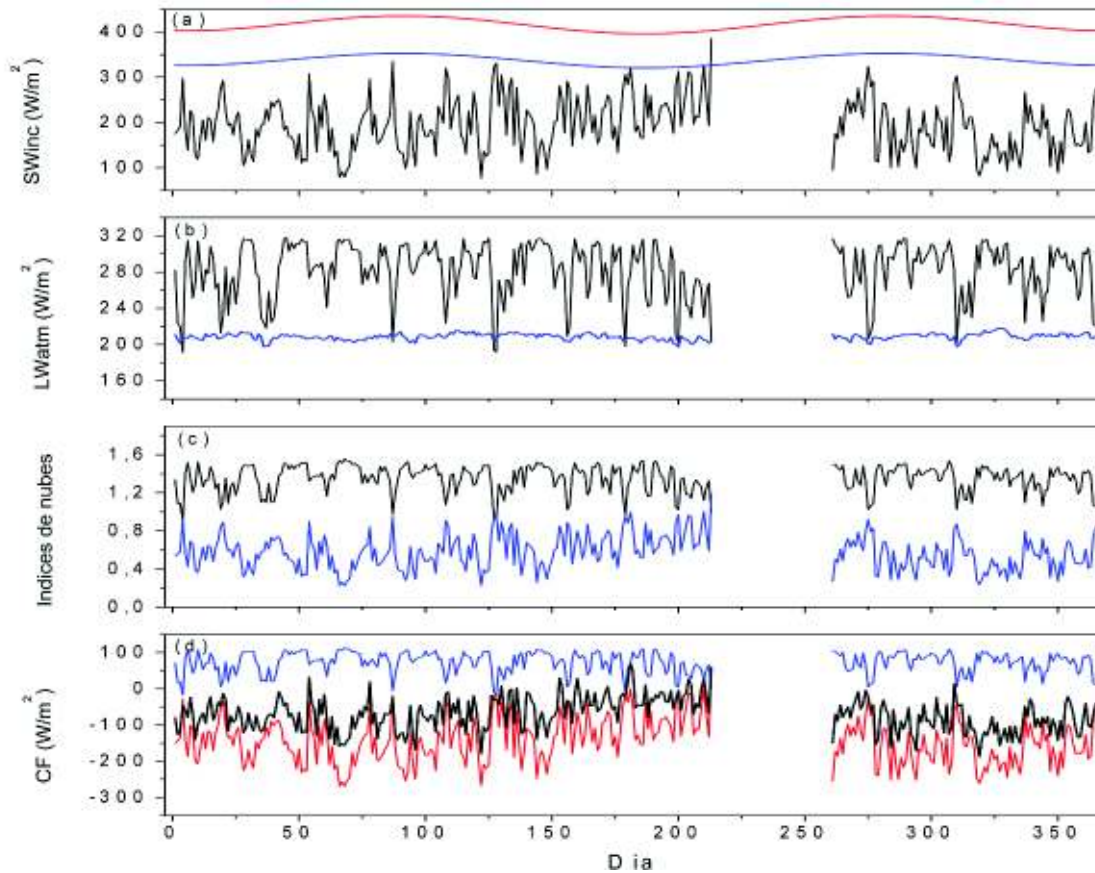
(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (Tn) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2006.

FIGURA A2.3: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2007



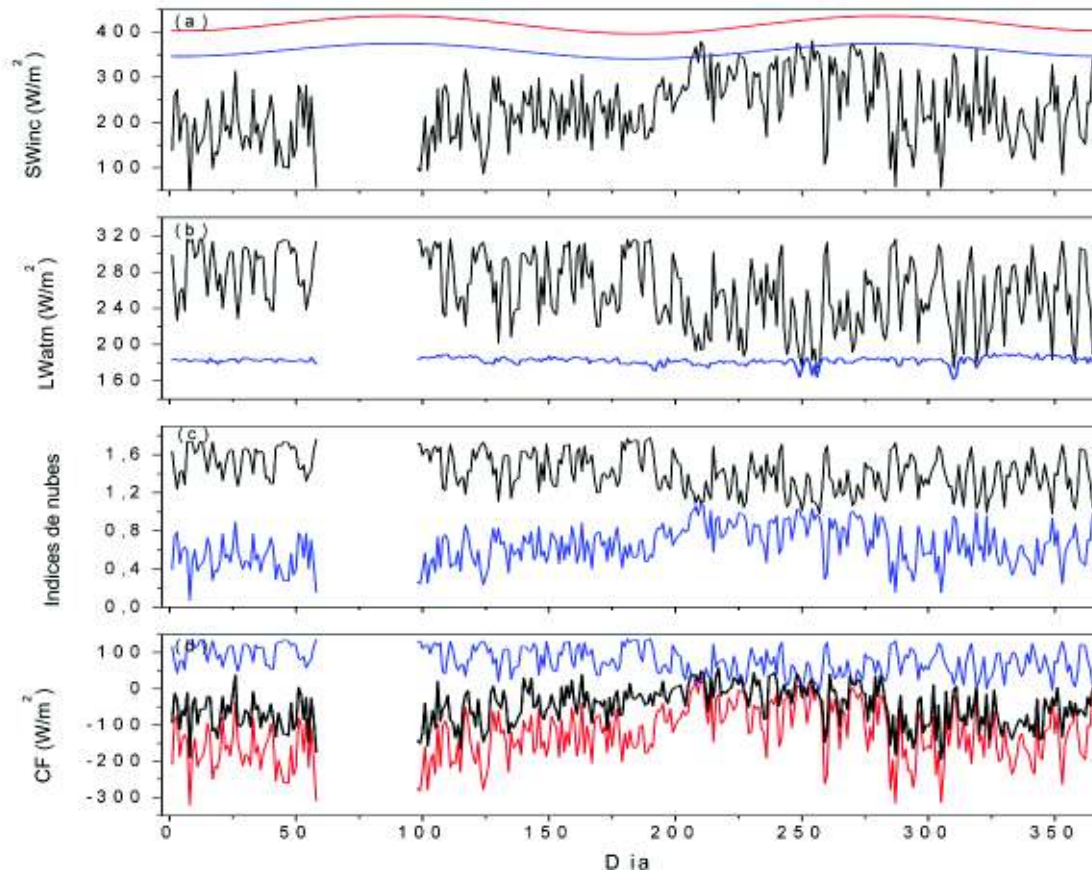
(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (Tn) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2007.

FIGURA A2.4: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2008



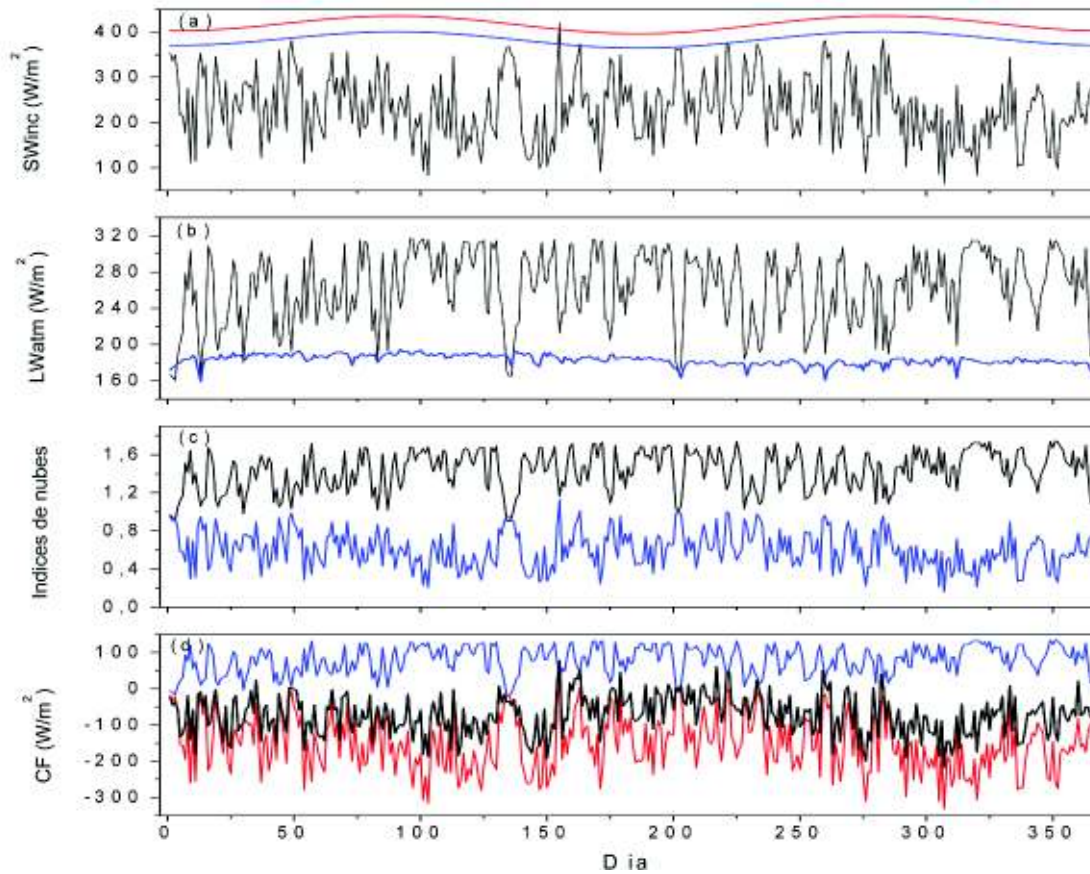
(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (Tn) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2008.

FIGURA A2.5: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2009



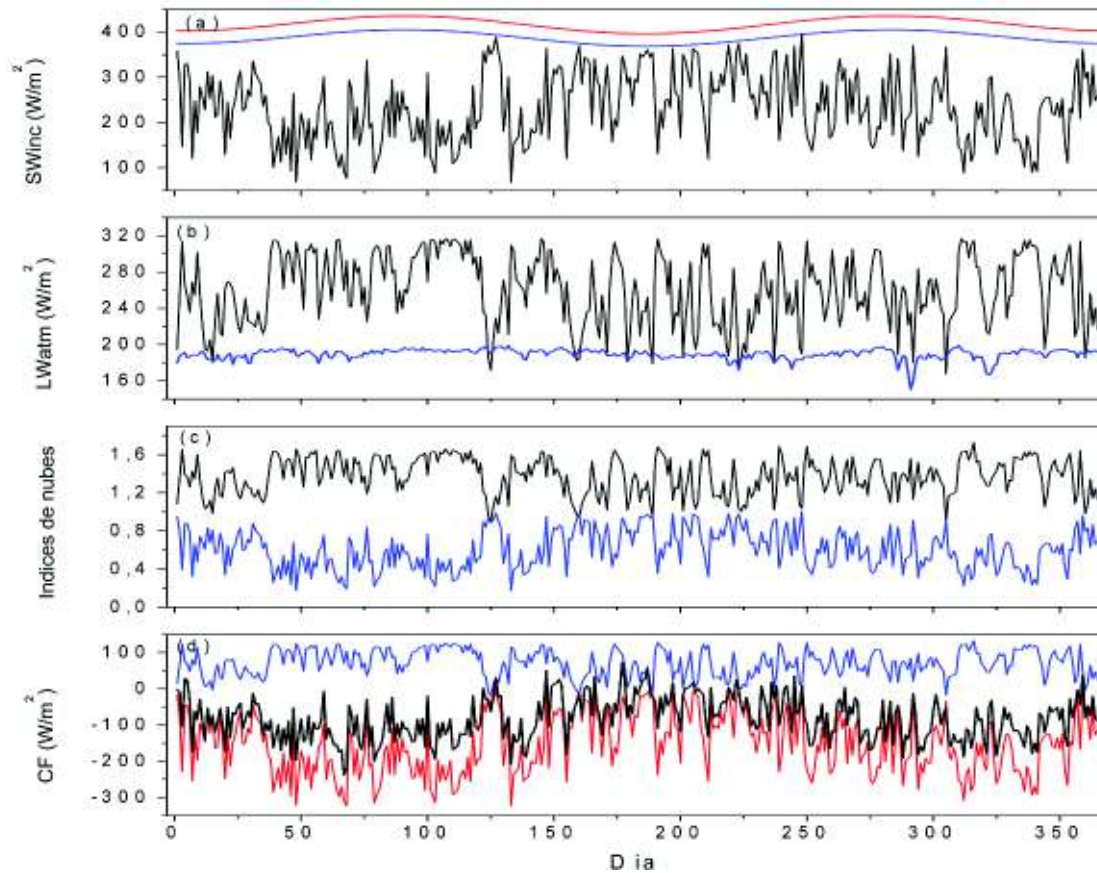
(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (T_n) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2009.

FIGURA A2.6: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2010



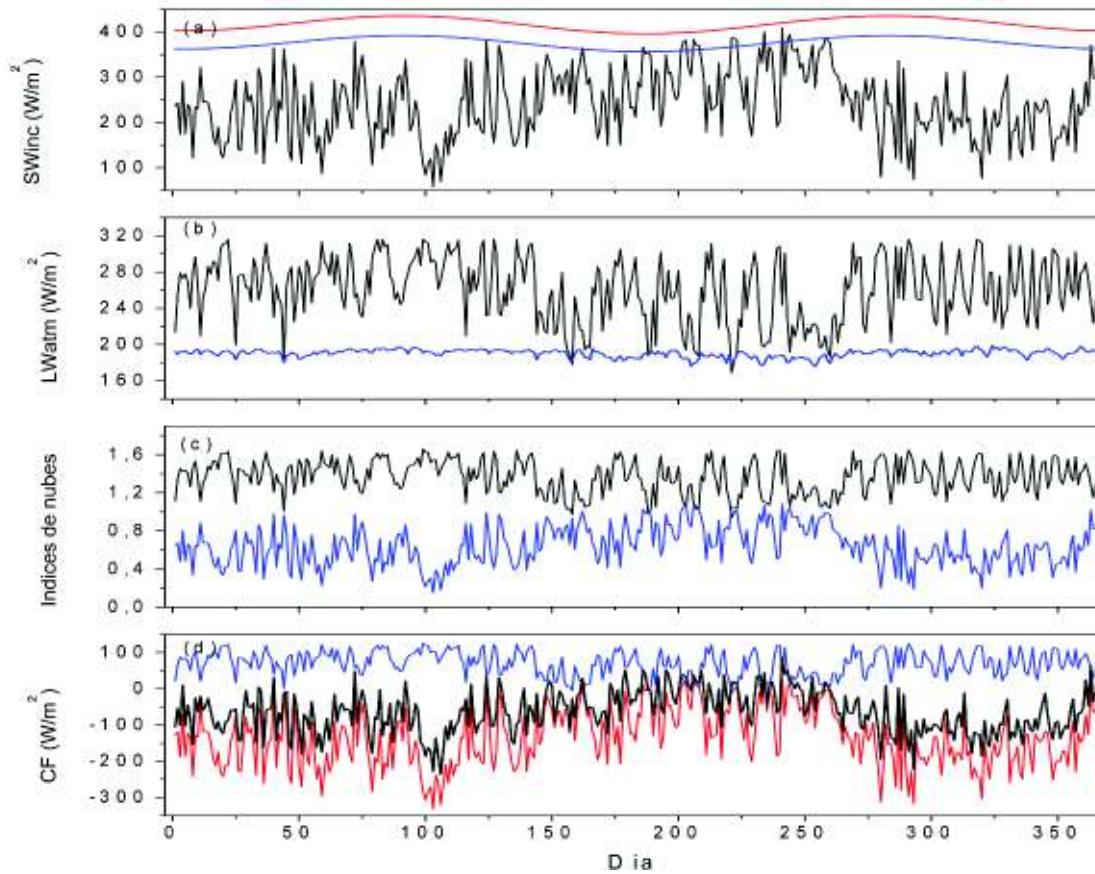
(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (Tn) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2010.

FIGURA A2.7: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2011



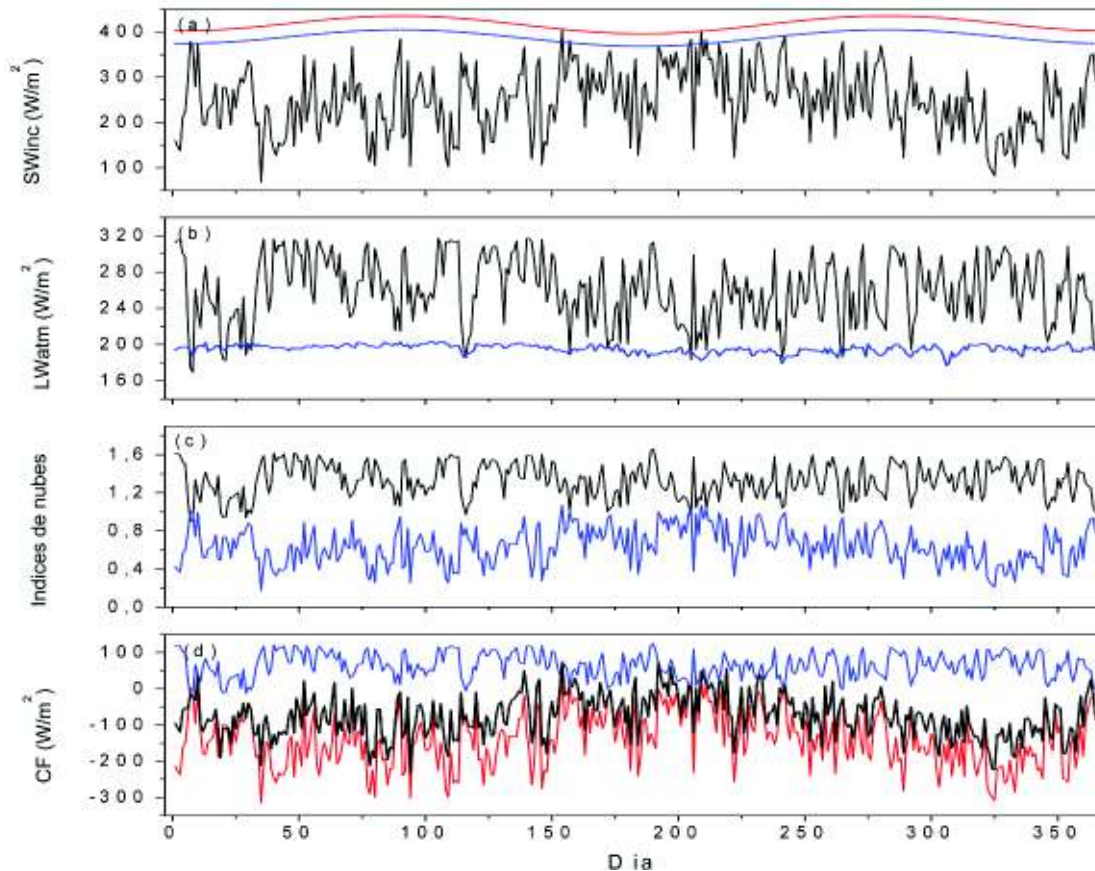
(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (Tn) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2011.

FIGURA A2.8: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2012



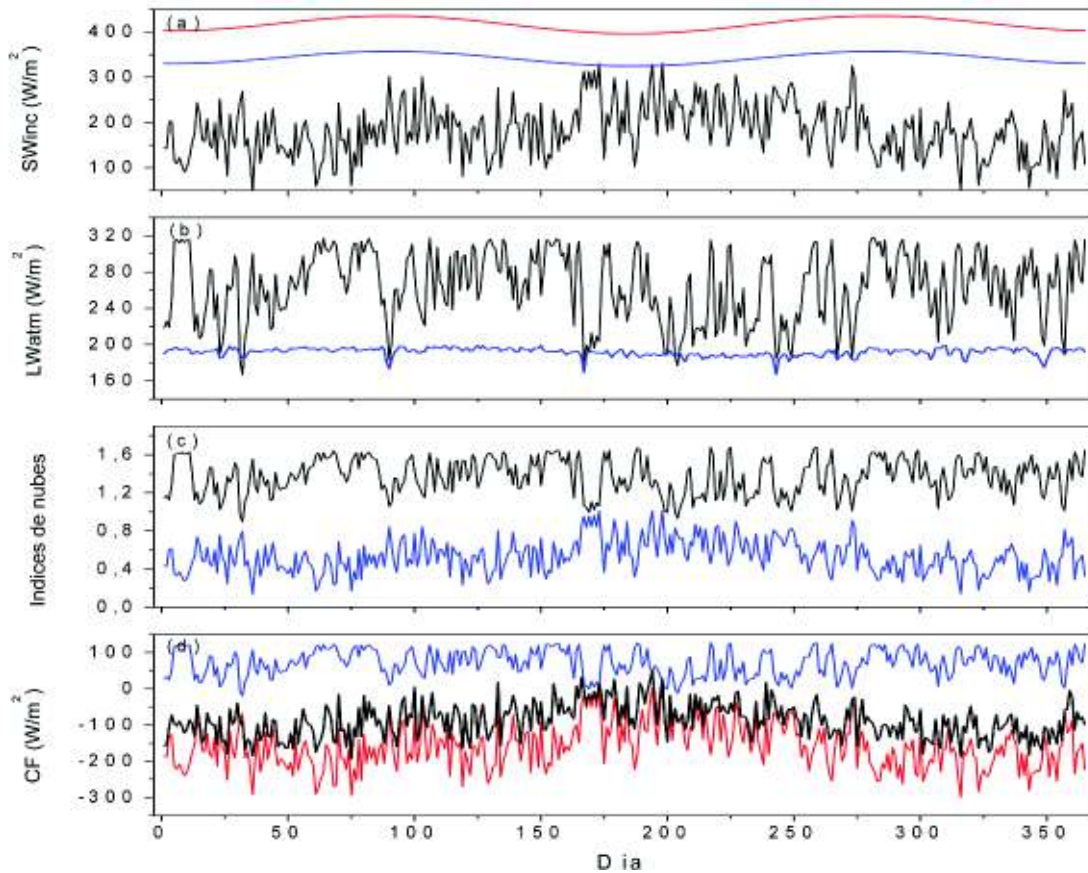
(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (Tn) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2012.

FIGURA A2.9: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2013



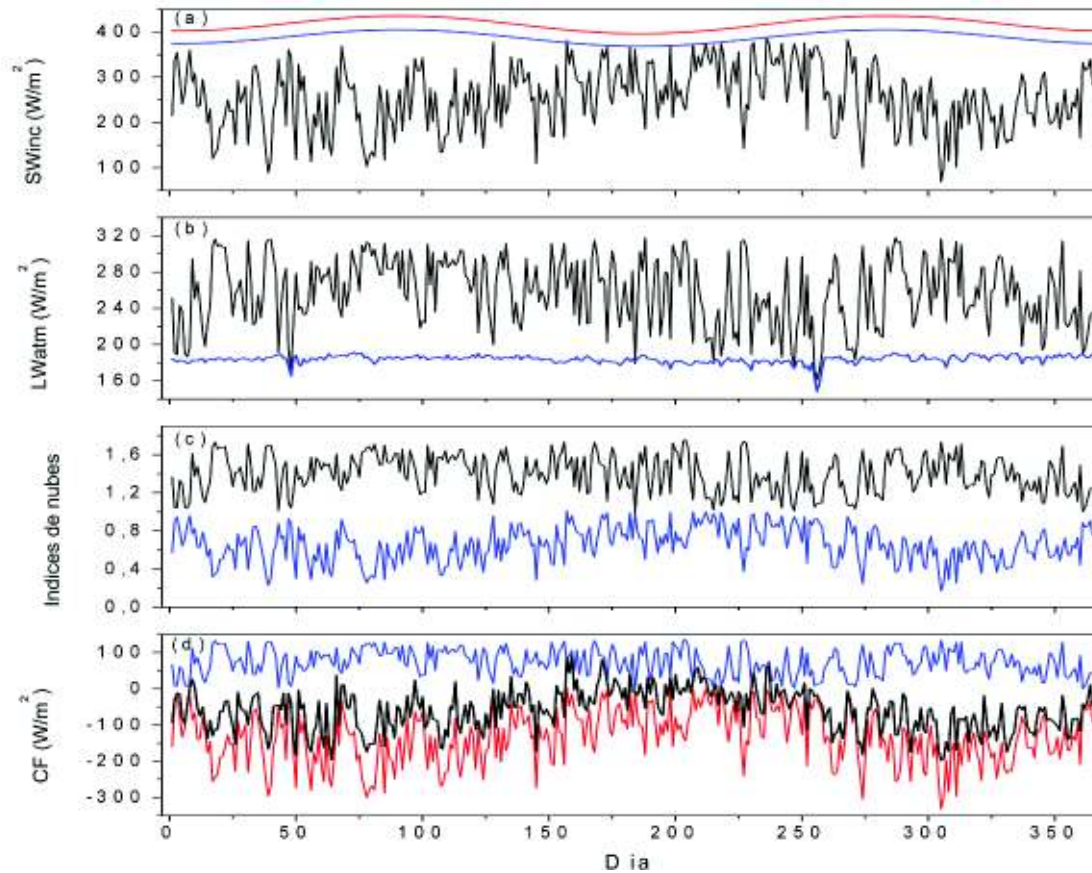
(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (T_n) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2013.

FIGURA A2.10: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2014



(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (Tn) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2014.

FIGURA A2.11: RADIACIONES INCIDENTES DE ONDA CORTA Y LARGA, ÍNDICES DE TRANSMISIVIDAD, EMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE FORZAMIENTO RADIATIVO DEL GLACIAR ANTISANA 15, AÑO 2015



(a) Flujo de radiación de onda corta incidente (SW_{inc}) en color negro. La línea de color rojo muestra la radiación solar teórica extraterrestre (S_{extra}) y la línea azul la radiación solar incidente en cielo despejado (S_{clear}). (b) La línea de color negro muestra el flujo de radiación incidente de onda larga (LW_{atm}) y la línea azul muestra la radiación teórica de onda larga en cielo despejado (L_{clear}). (c) Factores de emisividad (F) en color negro y transmisividad (Tn) en color azul. (d) Forzamiento radiativo de onda corta (CF_{SW}) en color rojo, onda larga (CF_{LW}) en color azul, y total (CF) en color negro. (a-d) Mediciones diarias en el glaciar Antisana 15 del año 2015.

ANEXO 3

PORCENTAJE DE FUSIÓN MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO DESPEJADO ($IN < 0.35$), SEMI CUBIERTO ($0.35 \leq IN < 1.20$) Y NUBLADO ($IN > 1.20$) DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)

TABLA A3.1: PORCENTAJE DE FUSIÓN MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO DESPEJADO ($IN < 0.35$) DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)

% de fusión para días despejados ($IN < 0.35$)												
Mes	2005	2006	2007	2008	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ene	-	13.38	-	15.40	-	-	25.88	11.51	-	32.95	-	18.78
Feb	21.09	9.58	12.81	-	-	-	11.44	-	4.36	-	5.21	13.98
Mar	-	-	-	11.03	-	-	8.73	-	-	5.76	1.85	-
Abr	-	-	-	8.71	-	-	-	-	5.24	3.48	-	-
May	-	10.63	-	20.14	-	-	27.08	40.16	12.62	-	-	6.24
Jun	18.38	29.48	8.48	11.95	-	-	10.85	28.39	15.24	23.07	17.15	5.22
Jul	28.93	-	21.60	21.02	12.07	12.45	9.79	37.09	38.70	23.00	11.40	8.82
Ago	25.24	5.39	39.05	-	-	-	18.89	19.81	26.23	19.36	2.56	18.83
Sep	31.41	14.24	-	-	29.51	-	-	6.48	21.19	9.58	9.42	28.10
Oct	-	4.96	-	8.64	-	-	3.21	-	-	4.93	-	-
Nov	-	-	-	7.99	NaN	-	-	10.60	-	-	-	-
Dic	-	-	-	-	NaN	-	-	2.44	-	5.35	4.89	9.22

**TABLA A3.2: PORCENTAJE DE FUSIÓN MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO DESPEJADO (IN<0.35)
DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)**

% de fusión para días despejados (IN<0.35)												
Mes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Ene	-	13.38	-	15.40	-	25.88	11.51	-	32.95	-	16.78	
Feb	21.09	9.58	12.81	-	-	11.44	-	4.36	-	5.21	13.96	
Mar	-	-	-	11.03	-	8.73	-	-	5.76	1.85	-	
Abr	-	-	-	8.71	-	-	-	5.24	3.48	-	-	
May	-	10.63	-	20.14	-	27.08	40.16	12.62	-	-	6.24	
Jun	18.38	29.48	8.48	11.95	-	10.85	26.39	15.24	23.07	17.15	5.22	
Jul	28.93	-	21.60	21.02	12.07	9.79	37.09	38.70	23.00	11.40	8.82	
Ago	25.24	5.39	39.05	-	12.45	18.89	19.81	26.23	19.36	2.56	18.83	
Sep	31.41	14.24	-	-	29.51	-	6.48	21.19	9.58	9.42	26.10	
Oct	-	4.96	-	8.64	-	3.21	-	-	4.93	-	-	
Nov	-	-	-	7.99	NaN	-	10.60	-	-	-	-	
Dic	-	-	-	-	NaN	-	2.44	-	5.35	4.89	9.22	

**TABLA A3.3: PORCENTAJE DE FUSIÓN MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO SEMI CUBIERTO
(0.35<=IN<1.20) DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)**

% de fusión para días semi cubiertos (0.35<=IN<1.20)												
Mes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Ene	63.21	85.54	100.00	84.60	78.35	72.63	85.91	89.10	65.69	83.96	76.12	
Feb	78.81	90.42	85.51	100.00	60.24	83.35	93.08	90.69	87.03	94.35	78.99	
Mar	37.74	99.21	98.75	85.15	-	84.57	93.89	93.01	91.01	75.76	87.28	
Abr	99.46	99.51	97.23	90.39	62.53	89.69	68.05	78.90	86.75	97.91	89.04	
May	32.20	89.37	99.03	79.51	92.99	61.15	59.74	82.81	94.59	91.78	88.09	
Jun	66.50	70.52	90.49	88.05	86.11	82.02	73.61	83.76	76.93	76.55	93.21	
Jul	71.07	-	56.86	78.98	62.92	78.49	58.08	61.30	77.00	84.95	91.18	
Ago	74.76	30.49	60.95	-	87.55	76.40	78.81	73.77	80.64	94.93	80.49	
Sep	68.22	85.76	-	45.23	59.51	92.59	91.22	78.81	90.42	88.14	73.90	
Oct	100.00	94.80	87.68	90.65	100.00	88.14	97.93	85.17	92.73	75.83	88.57	
Nov	100.00	98.61	99.54	91.05	NaN	69.53	84.57	89.09	84.99	90.00	91.32	
Dic	100.00	100.00	98.16	100.00	NaN	88.18	89.17	89.75	93.32	77.76	90.78	

**TABLA A3.4: PORCENTAJE DE FUSIÓN MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO NUBLADO (IN>1.20)
DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)**

		% de fusión para días nublados (IN>=1.20)											
Mes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
Ene	36.79	1.09	-	-	21.65	1.50	2.58	10.90	1.36	16.04	7.10		
Feb	0.10	-	1.68	-	39.76	5.21	6.92	4.96	12.97	0.44	7.04		
Mar	62.26	0.79	1.25	3.82	100.00	6.69	6.11	6.99	3.23	22.39	12.72		
Abr	0.54	0.49	2.77	0.91	37.47	10.31	31.95	15.86	9.78	2.09	10.96		
May	67.80	-	0.97	0.35	7.01	11.77	0.10	4.57	5.41	8.22	5.67		
Jun	15.11	-	1.03	-	13.89	7.13	-	1.00	-	6.30	1.57		
Jul	-	100.00	21.55	-	25.00	11.73	4.82	-	-	3.65	-		
Ago	-	64.11	-	100.00	-	4.71	1.38	-	-	2.51	0.68		
Sep	0.37	-	100.00	54.77	10.98	7.41	2.29	-	-	2.44	-		
Oct	-	0.23	12.32	0.71	-	8.65	2.07	14.83	2.34	24.17	11.43		
Nov	-	1.39	0.46	0.96	NaN	30.47	4.83	10.91	15.01	10.00	8.68		
Dic	-	-	1.84	-	NaN	11.82	8.40	10.25	1.33	17.34	-		

ANEXO 4

PORCENTAJE DE CAUDAL MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO DESPEJADO ($IN < 0.35$), SEMI CUBIERTO ($0.35 \leq IN < 1.20$) Y NUBLADO ($IN > 1.20$) DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)

**TABLA A4.1: PORCENTAJE DE CAUDAL MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO DESPEJADO
(IN<0.35) DEL PERÍODO DE ESTUDIO (2005-2015)**

% de caudal para días despejados (IN<0.35)												
Mes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Ene	12.65	6.80	3.85	13.13	-	37.31	18.04	NaN	31.57	6.33	18.13	
Feb	26.25	8.34	37.96	-	-	18.93	4.86	13.48	-	4.03	11.94	
Mar	4.87	15.73	4.35	5.04	-	14.55	-	8.48	11.98	3.24	3.92	
Abr	9.83	4.79	-	9.54	3.16	-	-	3.18	7.35	5.18	-	
May	4.18	27.89	4.73	18.99	2.76	18.64	40.80	22.17	-	NaN	6.70	
Jun	32.21	-	12.26	19.68	-	7.86	38.49	50.39	37.09	38.13	NaN	
Jul	36.12	-	41.22	25.51	11.90	8.22	59.20	100.00	33.06	34.65	NaN	
Ago	53.92	7.90	42.85	-	29.40	25.48	-	54.11	29.40	25.32	NaN	
Sep	46.92	23.99	-	-	53.45	-	11.02	37.11	13.34	35.45	NaN	
Oct	2.25	10.27	-	9.63	21.67	12.14	14.34	-	13.31	NaN	NaN	
Nov	7.35	-	21.67	3.49	25.94	-	4.89	4.53	-	NaN	NaN	
Dic	4.63	5.77	4.37	12.77	14.02	-	31.06	10.84	26.17	6.46	NaN	

**TABLA A4.2: PORCENTAJE DE CAUDAL MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO SEMI CUBIERTO
(0.35<=IN<1.20) DEL PERÍODO DE ESTUDIO (2005-2015)**

		% de caudal para días semi cubiertos (0.35<=IN<1.20)											
Mes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
Ene	52.71	91.96	96.15	86.87	73.00	57.09	79.77	NaN	61.96	70.00	70.28		
Feb	71.26	91.66	58.37	100.00	69.64	75.11	69.48	77.14	80.97	93.53	76.11		
Mar	31.49	80.93	92.69	83.00	-	75.31	82.68	85.29	82.45	69.86	71.09		
Abr	87.69	93.26	91.66	88.41	51.59	77.47	51.31	74.61	75.76	94.82	80.76		
May	20.71	72.11	92.55	78.82	80.91	54.59	57.36	72.64	91.55	NaN	87.00		
Jun	56.08	100.00	85.35	80.32	89.04	74.98	61.51	49.61	62.91	57.39	NaN		
Jul	63.88	-	33.15	74.49	63.32	75.55	40.80	-	66.94	65.35	NaN		
Ago	46.08	35.72	57.15	-	70.60	64.31	100.00	45.89	70.60	67.58	NaN		
Sep	52.13	76.01	-	42.41	40.66	100.00	84.64	62.89	86.66	64.55	NaN		
Oct	97.75	84.57	87.67	87.44	70.28	77.91	81.58	81.61	83.76	NaN	NaN		
Nov	92.65	97.73	76.04	92.92	70.62	67.24	79.92	82.52	82.75	NaN	NaN		
Dic	95.37	94.23	89.56	87.23	84.60	100.00	56.40	79.05	71.16	76.47	NaN		

**TABLA A4.3: PORCENTAJE DE CAUDAL MENSUAL CORRESPONDIENTE A LOS DÍAS CON CIELO NUBLADO (IN>1.20)
DEL PERIODO DE ESTUDIO (2005-2015)**

		% de caudal para días nublados (IN>=1.20)											
Mes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
Ene	34.64	1.24	-	-	27.00	5.60	2.18	NaN	6.47	23.66	11.59		
Feb	2.49	-	3.67	-	30.36	5.96	25.66	9.38	19.03	2.43	11.94		
Mar	63.64	3.34	2.95	11.96	100.00	10.15	17.32	6.23	5.57	26.90	25.00		
Abr	2.49	1.95	8.34	2.05	45.25	22.53	48.69	22.20	16.89	-	19.24		
May	75.11	-	2.72	2.19	16.33	26.78	1.85	5.18	8.45	NaN	6.30		
Jun	11.71	-	2.39	-	10.96	17.16	-	-	-	4.48	NaN		
Jul	-	100.00	25.63	-	24.78	16.23	-	-	-	-	NaN		
Ago	-	56.39	-	100.00	-	10.21	-	-	-	7.10	NaN		
Sep	0.95	-	100.00	57.59	5.89	-	4.34	-	-	-	NaN		
Oct	-	5.16	12.33	2.93	8.05	9.95	4.08	18.39	2.93	NaN	NaN		
Nov	-	2.27	2.29	3.60	3.44	32.76	15.19	12.95	17.25	NaN	NaN		
Dic	-	-	6.07	0.00	1.38	-	12.54	10.11	2.67	17.06	NaN		