

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA



MODELACIÓN DEL BALANCE DE MASA Y DEL  
DERRETIMIENTO GLACIAL EN TERRENO  
MONTAÑOSO CON TOPOGRAFÍA COMPLEJA

PROYECTO DE GRADO

*PRESENTA:*

*GABRIELA QUISPE SANCHEZ*

ASESOR: MSc. ING. JUAN PABLO FUCHS ARCE

LA PAZ - BOLIVIA

2021



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

*Dedicado a mis padres Juana y Damaso.*

*“Es muy importante que los jóvenes mantengan su sentido de maravilla  
y sigan preguntándose por que”  
Stephen Hawking.*

# Agradecimientos

Primeramente quiero darle gracias a Dios el haberme acompañado durante mis estudios y ayudado en los momentos en que todo parecía venirse abajo. Gracias por la oportunidad de vivir y por las inmensas bendiciones recibidas.

A mi familia y especialmente a mis padres por su apoyo incondicional y constante a lo largo de mis años en la Universidad.

Eterna e Infinitamente agradecida con el M.Sc. Ing. Juan Pablo Fuchs Arce, mi asesor de Proyecto de Grado y maestro tutor, quien siempre estuvo allí en la Universidad para atenderme aclarando mis dudas con profesionalismo, gran inteligencia, claridad y oportunidad. Sin su guía, ejemplo, positivismo y paciencia, este Proyecto de Grado no se hubiese elaborado. El ejemplo de honestidad, actitud de servicio y eficiencia que me ha dado lo llevaré siempre conmigo en mi trayectoria profesional. Gracias por brindarme la confianza y el apoyo necesario para exponer mi trabajo en otras latitudes y culturas.

Al Dr. Ing. Alvaro W. Soruco S, por haberme aceptado como su alumna en el Proyecto de Grado y por su enseñanza, su amistad y su confianza y por atenderme aclarando mis dudas con profesionalismo que fueron de gran ayuda para entender esta rama de la ingeniería. Le agradezco el tiempo que me dedicó durante la elaboración de este Proyecto.

Al MSc. Ing. Daniel Espinoza R. al haberme aceptado como alumna de Proyecto de Grado, por su enseñanza, su amistad y su confianza y por realizar observaciones en el proyecto que fueron de gran ayuda para entender mejor este tema. Le agradezco el tiempo que me dedicó durante la elaboración de este Proyecto. Gracias por todo su gran apoyo y profesionalismo.

Y al MSc. Ing. Carlos Herbas C. y Dr. Ing. Jose Luis Montaña por sus enseñanzas y enfoque. Les agradezco el tiempo que me dedicaron durante la elaboración de este Proyecto.

A todos mis compañeros de la Universidad de Ingeniería Civil y amigos que me ayudaron al explicarme temas computacionales dejando el tedio en el olvido y a Mateo Olson, quien me ayudó mucho al responder mis inquietudes de su investigación en mi Proyecto de Grado y al Dr. Javier Corripio y Dr. Romain Biron por haberme colaborado con información acerca del Proyecto de grado.

A la Universidad Mayor de San Andrés, a la Facultad de Ingeniería Civil y al Instituto de Hidráulica e Hidrológica IHH por la formación profesional que me proporcionaron.

A todos mis queridos maestros con todo mi respeto y admiración.

## Resumen

El balance de masa es una metodología que, aplicada a los glaciares, se utiliza para cuantificar el proceso de fusión que sufre un glaciar. Con esta información es posible inferir la cantidad de agua (en estado sólido) que se encuentra en reserva y así tomar decisiones en base a la oferta y demanda hídrica. El objetivo de este trabajo es mostrar la viabilidad de los resultados al modificar el modelo de índice de temperatura mejorado ETI (Pellicciotti et al., 2005), para analizar y evaluar el cambio que ocurrió en los resultados del modelo al considerar la variabilidad en la radiación solar directa, sobre y alrededor del glaciar Zongo, debido al sombreado topográfico que incluye relieve sombreado, sombras proyectadas, pendiente-aspecto y la combinación de todos. El modelo se aplica al glaciar Zongo y se evalúa la sensibilidad mensual del sombreado topográfico para dos años hidrológicos 2004-2006. Nuestros resultados muestran que el sombreado topográfico altera significativamente la posible radiación solar directa en cielo despejado y genera diferentes resultados de balance de masa con respecto a los datos observados en el glaciar. Estos resultados sugieren que el sombreado topográfico altera el balance energético de la superficie, pero también influye en la respuesta del glaciar y la estimación del balance de masa en el glaciar Zongo.

## Abstract

The mass balance is a methodology that, when applied to glaciers, is used to quantify the melting process that a glacier undergoes. With this information it is possible to infer the amount of water (in solid state) that is in reserve and thus make decisions based on the water supply and demand. The objective of this work is to show the feasibility of the results when modifying the enhanced temperature index model ETI (Pellicciotti et al., 2005), to analyze and evaluate the change that occurred in the model results when considering the variability in direct solar radiation on and around the Zongo glacier, due to topographic shading that includes shaded relief, cast shadows, slope-aspect and the combination of all. The model is applied to the Zongo glacier and the monthly sensitivity of the topographic shading is evaluated for two hydrological years 2004-2006. Our results show that topographic shading significantly alters the possible direct clear-sky solar radiation and generates different mass balance results with respect to the data observed on the glacier. These results suggest that topographic shading alters the surface energy balance, but also influences the glacier response and mass balance estimation on the Zongo glacier.

# Índice general

<b>1. Generalidades.</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Antecedentes . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	4
1.3.1. Objetivo General . . . . .	4
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	4
1.4. Justificación General . . . . .	5
1.5. Metodología . . . . .	5
1.6. Alcance y limitaciones . . . . .	7
1.6.1. Alcance . . . . .	7
1.6.2. Limitaciones . . . . .	8
<b>2. Características Generales del área de estudio</b>	<b>10</b>
2.1. Área de Estudio. . . . .	10
2.2. Glaciar Zongo (Bolivia) . . . . .	11
2.3. Características Físicas. . . . .	12
<b>3. Fundamento Teórico</b>	<b>14</b>
3.1. Glaciar . . . . .	14
3.2. Clasificación de los glaciares . . . . .	14
3.2.1. Casquetes de hielo continental o Islandis. . . . .	14
3.2.2. Glaciares de piedemonte. . . . .	15
3.2.3. Glaciares de valle. . . . .	16
3.2.4. Glaciares de cráter. . . . .	16
3.2.5. Glaciares de montaña. . . . .	16
3.2.6. Glaciares de circo. . . . .	17
3.2.7. Glaciares rocosos. . . . .	17
3.3. Glaciar Tropical . . . . .	19
3.3.1. Zonificación teórica de un glaciar . . . . .	24
<b>4. Contexto Climático Continental y Local.</b>	<b>26</b>
4.1. Climatología. . . . .	26
4.1.1. Glaciares y Clima . . . . .	27
4.2. ENSO . . . . .	27

4.2.1. Acumulación neta en función del tiempo en la altura (~ 6000 m): El caso del glaciar de Zongo (Bolivia) . . . . .	33
<b>5. Generación de base de datos.</b>	<b>38</b>
5.1. Estaciones de monitoreo en Zongo. . . . .	39
5.1.1. Estación meteorológica Mévis a 4750 metros (Plataforma). . . . .	40
5.1.2. Estación meteorológica ORE a 5050 m.s.n.m . . . . .	41
5.1.3. Medidas realizadas sobre el glaciar, estación SAMA. . . . .	46
5.1.4. Síntesis . . . . .	47
5.2. Datos Hidro-glacio-meteorológicos. . . . .	48
5.2.1. Temperatura del Aire. . . . .	48
5.2.2. Humedad Relativa. . . . .	49
5.2.3. Precipitación. . . . .	50
5.2.4. Radiación de onda corta. . . . .	51
5.2.5. Radiación de onda larga. . . . .	52
5.2.6. Datos hidrológicos. . . . .	53
5.2.7. Datos glaciológicos. . . . .	53
5.3. Datos Espaciales del terreno. . . . .	55
<b>6. Balance de masa glaciario: conceptos y técnicas de medida</b>	<b>59</b>
6.1. Modelos de derretimiento . . . . .	59
6.1.1. Balance de Masa . . . . .	59
6.1.2. Zonas de un glaciar . . . . .	59
6.2. Métodos de estimación del balance de masa. . . . .	62
6.2.1. Método directo o balance glaciológico. . . . .	62
6.2.2. Método indirecto o balance hidrológico. . . . .	64
6.2.3. Método topográfico (“Método geodésico”) . . . . .	64
6.3. Modelos de fusión. . . . .	65
6.3.1. Modelo de escorrentía y deshielo (SRM). . . . .	65
6.3.2. Modelo de índice de temperatura mejorado (ETI) . . . . .	66
6.3.3. Modelo de índice de temperatura mejorado que incluye la parametrización de albedo (ETI + A). . . . .	67
6.3.4. Base física para el modelo de índice de temperatura mejorado. . . . .	67
6.4. Modelado de radiación solar. . . . .	76
6.4.1. Vector que define una superficie inclinada. . . . .	76
6.4.2. Vector que define la posición del sol. . . . .	78
6.4.3. Ángulo de incidencia del sol en superficies inclinadas. . . . .	82
6.4.4. Relieve sombreado. . . . .	82
6.4.5. Factor de cielo visible (cielo despejado). . . . .	84
6.4.6. Modelado topográfico . . . . .	85
6.5. Evaluación del desempeño de los modelos ETI y SETI. . . . .	87
<b>7. Aplicación del modelo - Análisis de resultados y conclusiones.</b>	<b>89</b>
7.1. Datos de entrada para los modelos ETI y SETI. . . . .	90
7.1.1. Evaluación del modelo de derretimiento ETI en el glaciar Zongo. . . . .	110



7.1.2. Evaluación del Modelo de derretimiento SETI en el glaciar Zongo.	113
7.2. Análisis de resultados	124
7.2.1. Comparación de modelos SETI y ETI vs. datos observados	124
<b>8. Conclusiones y recomendaciones.</b>	<b>131</b>
8.1. Conclusiones	131
8.2. Recomendaciones	132
<b>A. ANEXOS</b>	<b>139</b>
A.1. Datos de entrada medidos en las estaciones en el glaciar Zongo para los años septiembre 2004 - agosto 2006.	139
A.2. Código del Modelo de índice de temperatura mejorado (ETI) y Modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) para los años 2004-2006	158
A.3. Alternativas de los valores autocalibrados de TF y SRF con sus respectivos errores	172
A.4. Resultados del Modelo de Índice de Temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para el año 2004-2006	186
A.4.1. Resultados del Modelo de Índice de Temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para el año 2005-2006	202

# Índice de figuras

1.1. Esquema que ilustra los pasos del proyecto para calcular el balance de masa en el glaciar Zongo. . . . .	9
2.1. Ubicación de Bolivia en América del Sur. Fuente: ESRI, Google Earth. . . . .	10
2.2. Ubicación geográfica de los glaciares Zongo y Huayna Potosí Oeste en la Cordillera Real (izquierda) y en el Macizo Huayna Potosí (derecha). Fuente: ESRI, Google Earth. . . . .	11
2.3. Perfil Topográfico del glaciar Zongo en base a datos de satélite ASTER GDEM. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	11
2.4. Mapa del glaciar Zongo que muestra las posiciones de las estaciones meteorológicas automáticas (AWS) y la estación hidrométrica. Fuente: Fuchs (2013) . . . . .	13
3.1. Casquete de hielo continental en Antártica Occidental. . . . .	15
3.2. Glaciar de Piedemonte. . . . .	15
3.3. Cráter del Volcán Lonquimay, Chile 1989. . . . .	16
3.4. Glaciar de montaña. Glaciar Zongo, Bolivia. . . . .	16
3.5. Mapa de los glaciares de roca a lo largo de los Andes bolivianos. . . . .	18
3.6. Distribución de los glaciares tropicales en el mundo. . . . .	19
3.7. Esquema de zonificación glaciar. Línea de Equilibrio (ELA). Fuente: Rivera et al. (2016). . . . .	25
4.1. La circulación atmosférica sobre el ecuador “la circulación de Walker”. Fenómeno ENSO . . . . .	28
4.2. Balance de masa mensual del glaciar del Antisana, Ecuador, y el glaciar La Conejeras, Colombia, conjuntamente con las anomalías de temperatura superficial del océano. . . . .	31
4.3. El índice multivariado del ENSO (MEI) . . . . .	32
4.4. Evolución de la acumulación neta medida a 5800 m s.n.m. sobre el glaciar de Zongo en septiembre de cada año. . . . .	34
4.5. Una gráfica del Índice de Oscilación del Sur (SOI) derivado de las mediciones de presión en Tahití y Darwin. . . . .	35
4.6. Una gráfica del Índice de Oscilación del Sur (SOI) derivado de las mediciones de presión en Tahití y Darwin. . . . .	35
4.7. El índice ENSO multivariante (MEI). . . . .	36

4.8. Regiones en las que se divide el Océano Pacífico Ecuatorial para estudiar el Fenómeno ENSO. Fuente: <a href="https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/">https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/</a> . . . . .	37
5.1. Ubicación del equipo de monitoreo en el glaciar Zongo. Fuente: Wagnon et al. (1999a) . . . . .	39
5.2. Indicador de precipitación sólida (izquierda) y sensores de disdrómetro, temperatura y humedad (derecha) en Zongo-m. Fuente: Yoshihiro Asaoka . . . . .	40
5.3. Estación meteorológica Mevis a 4750 m de altitud (Rabatel et al., 2004). . . . .	41
5.4. Ubicación de la estación Zongo (Foto B. Pouyaud, del 04/08/2000). Fuente: Francou et al. (2004a) . . . . .	41
5.5. Estación de Campo Roca: Sistema de adquisición de datos, CR800 de Campbell Scientific; Temperatura y Humedad Relativa del aire, CS215 de Campbell Scientific; velocidad y dirección del viento, Windsonic de Gill; pluviómetro, T200B de Geonor. Fuente: Romain Biron . . . . .	42
5.6. Esquema del pluviógrafo a pesadas GEONOR. Fuente: Francou et al. (2004a) . . . . .	43
5.7. Plano de la estación ORE-Zongo. Los números de código se refieren a la tabla 5.1, con N° 0 : zona para pisar, N° 14 : Palo para fotos, 15, ángulo para la toma de la foto 5.8. Fuente: Francou et al. (2004a) . . . . .	43
5.8. Foto de la estación ORE -Zongo (T.Berger), 23/12/2004. Los números de código se refieren a la tabla 5.1, en el código 3 se observa una pantalla corta-viento formada por 32 láminas de metal mantenidas por una estructura circular de 1.20 metros de diámetro. Fuente: Francou et al. (2004a) . . . . .	44
5.9. Sensor de flujo de calor HFP01. Fuente: <a href="https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-meters/hfp01-heat-flux-sensor">https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-meters/hfp01-heat-flux-sensor</a> . . . . .	45
5.10. Abrigo y mecanismo de ventilación de la sonda higrotermométrica Vaisala HMP45C. Fuente: Francou et al. (2004a) . . . . .	46
5.11. Radiómetro Kipp & Zonen, modelo CNR1. Fuente: Francou et al. (2004a) . . . . .	46
5.12. Estación en el glaciar. Fuente: Romain Biron . . . . .	47
5.13. Temperaturas diarias del aire registradas en Zongo y Chacaltaya. La línea continua corresponde a los datos utilizados para ejecutar el modelo y los puntos indican la temperatura medida en las estaciones restantes. Fuente: Fuchs (2013) . . . . .	49
5.14. Humedad relativa diaria registrada en la estación meteorológica Zongo-m. Fuente: Fuchs (2013) . . . . .	50
5.15. Precipitación diaria registrada en la estación meteorológica Plataforma. Fuente: Fuchs (2013) . . . . .	51
5.16. La radiación solar entrante es interceptada como componentes directos, difusos o reflejados. Fuente: <a href="https://www.esri.com/en-us/about/about-esri/overview">https://www.esri.com/en-us/about/about-esri/overview</a> . . . . .	51
5.17. Radiación global observada (línea negra) y albedo (línea azul) en Estación Zongo-g. Fuente: Fuchs (2013) . . . . .	52
5.18. Descarga diaria observada en Zongo. Fuente: Fuchs (2013) . . . . .	53
5.19. Localización de las balizas y pozos en el glaciar Zongo, Cordillera Real, La Paz-Bolivia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	54
5.20. Instalación de una baliza utilizando el sistema de perforación tipo barreno. Fuente: Daniela Carrión. . . . .	55

5.21. Modelo Digital de Elevación DEM del glaciar Zongo. Fuente: Elaboración Propia	57
5.22. Modelo Digital de Elevación DEM del glaciar Zongo. Fuente: Elaboración Propia	58
6.1. Zonas de un glaciar en función de los procesos del balance de masa de un glaciar, donde se muestran las curvas típicas estacionales del balance de masa a lo largo del año (las curvas son idealizaciones). Fuente: Cuffey and Paterson (2010)	60
6.2. Esquema de zoificación glacial línea de equilibrio (ELA). Fuente: Andrés Rivera	60
6.3. Subzonas de un glaciar. Fuente: Cuffey and Paterson (2010)	61
6.4. Medición de una baliza. Glaciar Rita Cuba Blanco, Sierra Nevada de el Cocuy, Colombia. Fuente: Rivera et al. (2016)	62
6.5. Diagrama esquemático de la variación de la altura en un glaciar para dos instantes consecutivos. Aquí puede observarse la altura de la emergencia (z), nieve (y) y hielo (h) para los instantes respectivos. Fuente: Rivera et al. (2016)	63
6.6. Balance energético de la superficie de la Tierra e intercambios con la atmósfera promediados para el mundo en un año. Los flujos se expresan en $W m^{-2}$ . Fuente: Kiehl and Trenberth (1997)	68
6.7. Factores impulsores y de respuesta en el balance energético de la superficie del glaciar. $E_S$ y $E_L$ representan las radiaciones netas de onda corta y de onda larga, $E_R$ es la radiación neta, y $E_N$ representa el flujo neto. Los colores azules representan flujos durante la estación húmeda (septiembre de 2005 y diciembre de 2005, estación meteorológica Zongo). Fuente: Fuchs (2013)	71
6.8. Vector normal a una superficie de celda de cuadrícula.	77
6.9. Rotación del sistema de coordenadas topocéntricas XYZ.	79
6.10. Sombreado.	83
6.11. Factor de vista del cielo.	84
6.12. El diagrama que ilustra la derivación de las ecuaciones (6.65) - (6.68).	87
7.1. Valores calibrados de TF ( $mm dia^{-1} (°C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm dia^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005.	99
7.2. Valores calibrados de TF ( $mm dia^{-1} (°C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm dia^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005.	100
7.3. Valores calibrados de TF ( $mm dia^{-1} (°C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm dia^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006.	100
7.4. Valores calibrados de TF ( $mm dia^{-1} (°C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm dia^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006.	101
7.5. Valores calibrados de TF ( $mm dia^{-1} (°C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm dia^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005.	102
7.6. Valores calibrados de TF ( $mm dia^{-1} (°C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm dia^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005.	102
7.7. Valores calibrados de TF ( $mm dia^{-1} (°C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm dia^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005.	103
7.8. Valores calibrados de TF ( $mm dia^{-1} (°C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm dia^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005.	103
7.9. Valores calibrados de TF ( $mm dia^{-1} (°C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm dia^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005.	104

7.10. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005. . . . .	104
7.11. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005. . . . .	105
7.12. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005. . . . .	105
7.13. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006. . . . .	106
7.14. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006. . . . .	106
7.15. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006. . . . .	107
7.16. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006. . . . .	107
7.17. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006. . . . .	108
7.18. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006. . . . .	108
7.19. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006. . . . .	109
7.20. Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006. . . . .	109
7.21. Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 2G ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2004–2005. .	110
7.22. Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 9K ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2004–2005. .	111
7.23. Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca X1 ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2004–2005. .	111
7.24. Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 16N ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2005–2006. .	112
7.25. Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 7N ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2005–2006. .	112
7.26. Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 10N ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2005–2006. .	113
7.27. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005. . . . .	115

7.28. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005. . . . .	115
7.29. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005. . . . .	116
7.30. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005. . . . .	116
7.31. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005. . . . .	117
7.32. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005. . . . .	117
7.33. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005. . . . .	118
7.34. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005. . . . .	118
7.35. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2005-2006. . . . .	119
7.36. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2005-2006. . . . .	119
7.37. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2005-2006. . . . .	120
7.38. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2005-2006. . . . .	120
7.39. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 13N durante el periodo 2005-2006. . . . .	121
7.40. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 13N durante el periodo 2005-2006. . . . .	121
7.41. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 13N durante el periodo 2005-2006. . . . .	122
7.42. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 13N durante el periodo 2005-2006. . . . .	122

7.43. Eficiencia del modelo SETI para las estacas en el glaciar Zongo para los años 2004-2006. . . . .	125
7.44. Cambio medio en la irradiancia debido al relieve sombreado (SR), sombras proyectadas (CS), pendiente y aspecto (SA) y la combinación de los parámetros topográficos (C), para el mes de mayo del año 2006 elaborado a través del código Toposol para la estaca 1H con elevación 5186 m s.n.m. Fuente: Elaboración propia. . . . .	126
7.45. Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado ETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo ETI. Para los años 2005-2006. . . . .	127
7.46. Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo SETI, considerando el relieve sombreado (SR) en el glaciar. Para los años 2005-2006. . . . .	128
7.47. Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo SETI, considerando la pendiente y aspecto (SA) en el glaciar. Para los años 2005-2006. . . . .	128
7.48. Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo SETI, considerando las sombras proyectadas (CS) en el glaciar. Para los años 2005-2006. . . . .	129
7.49. Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo SETI, considerando el combinado de los factores de sombreado topográficos (C) en el glaciar. Para los años 2005-2006. . . . .	129
7.50. Valores óptimos de TF y SRF en el espacio de parámetros para los sitios de estudio y temporadas examinadas en el estudio de Carenzo et al. (2009). TF y SRF se expresan en $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{h}^{-1}$ y $\text{mm } \text{m}^2\text{W}^{-1}\text{h}^{-1}$ , respectivamente. Fuente: Carenzo et al. (2009) . . . . .	130
7.51. Valores óptimos de TF y SRF en el espacio de los parámetros para el Glaciar Juncal Norte y para los sitios de estudio y temporadas examinados para los Alpes europeos. Las etiquetas “Arolla” y “Gorner” indican Haut Glacier d’Arolla y Gornergletscher, respectivamente. Los números junto a Arolla designan diferentes AWS (ver Pellicciotti et al. (2008) para una explicación detallada). TF y SRF se expresan en $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{h}^{-1}$ y $\text{mm } \text{m}^2\text{W}^{-1}\text{h}^{-1}$ , respectivamente. Fuente: Pellicciotti et al. (2008) . . . . .	130
A.1. Estaca 6K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	186

A.2. Estaca 6K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	187
A.3. Estaca 6K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	187
A.4. Estaca 6K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	188
A.5. Estaca 9K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	188
A.6. Estaca 9K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	189
A.7. Estaca 9K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	189
A.8. Estaca 9K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	190
A.9. Estaca 10K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	190
A.10. Estaca 10K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	191



A.11. Estaca 10K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	191
A.12. Estaca 10K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	192
A.13. Estaca 11K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	192
A.14. Estaca 11K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	193
A.15. Estaca 11K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	193
A.16. Estaca 11K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	194
A.17. Estaca 12K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	194
A.18. Estaca 12K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	195
A.19. Estaca 12K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	195

A.20. Estaca 12K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	196
A.21. Estaca 4F Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	196
A.22. Estaca 4F Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	197
A.23. Estaca 4F Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	197
A.24. Estaca 4F Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	198
A.25. Estaca 2G Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	198
A.26. Estaca 2G Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	199
A.27. Estaca 2G Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	199
A.28. Estaca 2G Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	200

A.29. Estaca XI Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	200
A.30. Estaca XI Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	201
A.31. Estaca XI Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	201
A.32. Estaca XI Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	202
A.33. Estaca 1H Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	203
A.34. Estaca 1H Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	203
A.35. Estaca 1H Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	204
A.36. Estaca 1H Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	204
A.37. Estaca 2G Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	205

A.38. Estaca 2G Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	205
A.39. Estaca 2G Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	206
A.40. Estaca 2G Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	206
A.41. Estaca 1K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	207
A.42. Estaca 1K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	207
A.43. Estaca 1K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	208
A.44. Estaca 1K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	208
A.45. Estaca 6K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	209
A.46. Estaca 6K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	209

A.47. Estaca 6K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	210
A.48. Estaca 6K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	210
A.49. Estaca 1N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	211
A.50. Estaca 1N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	211
A.51. Estaca 1N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	212
A.52. Estaca 1N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	212
A.53. Estaca 7N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	213
A.54. Estaca 7N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	213
A.55. Estaca 7N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	214

A.56.Estaca 7N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	214
A.57.Estaca 8N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	215
A.58.Estaca 8N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	215
A.59.Estaca 8N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	216
A.60.Estaca 8N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	216
A.61.Estaca 9N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	217
A.62.Estaca 9N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	217
A.63.Estaca 9N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	218
A.64.Estaca 9N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	218

A.65.Estaca 10N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	219
A.66.Estaca 10N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	219
A.67.Estaca 10N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	220
A.68.Estaca 10N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	220
A.69.Estaca 11N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	221
A.70.Estaca 11N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	221
A.71.Estaca 11N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	222
A.72.Estaca 11N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	222
A.73.Estaca 12N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	223

A.74. Estaca 12N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	223
A.75. Estaca 12N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	224
A.76. Estaca 12N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	224
A.77. Estaca 13N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	225
A.78. Estaca 13N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	225
A.79. Estaca 13N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	226
A.80. Estaca 13N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	226
A.81. Estaca 14N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	227
A.82. Estaca 14N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	227



A.83. Estaca 14N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	228
A.84. Estaca 14N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	228
A.85. Estaca 16N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	229
A.86. Estaca 16N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	229
A.87. Estaca 16N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	230
A.88. Estaca 16N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	230
A.89. Estaca 2G Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	231
A.90. Estaca 2G Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	231
A.91. Estaca 2G Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	232

A.92. Estaca 2G Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	232
A.93. Estaca 2E Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	233
A.94. Estaca 2E Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	233
A.95. Estaca 2E Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	234
A.96. Estaca 2E Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	234
A.97. Estaca X1 Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	235
A.98. Estaca X1 Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	235
A.99. Estaca X1 Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	236
A.100. Estaca X1 Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	236

A.101 Estaca X2 Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	237
A.102 Estaca X2 Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	237
A.103 Estaca X2 Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	238
A.104 Estaca X2 Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado. . . . .	238

# Índice de tablas

2.1. Zonas de elevación y área cubierta de glaciares (GCA) del glaciar Zongo. . . . .	13
3.1. Estimación de las áreas y volúmenes de los distintos componentes de la criósfera. .	20
3.2. Distribución de los glaciares en la zona tropical. . . . .	21
5.1. Listado de los parámetros e instrumentos monitoreados. . . . .	42
6.1. Parámetros relevantes para los flujos de calor sensible y latente. . . . .	70
6.2. Medias mensuales de los flujos de energía. Todos los valores están en $W m^{-2}$ . El período de cálculo se extiende desde marzo de 2005 hasta mayo de 2006 en la estación meteorológica Zongo. Los valores medios y las desviaciones estándar (Std. Dev.) De cada flujo durante el período también se muestran en las últimas dos filas. . . . .	71
6.3. Datos meteorológicos mensuales y estimación de factores de temperatura mensual en la estación meteorológica Zongo. . . . .	75
7.1. Resumen de datos de entrada mensuales medidos en las estaciones en el glaciar Zongo para el periodo septiembre 2004 - agosto 2006. . . . .	91
7.2. Datos de elevación para las estacas y pozos en el glaciar Zongo años 2004-2005 y 2005-2006. . . . .	92
7.3. Datos de entrada de balance de masa mensuales medidos en las balizas en el glaciar Zongo para el periodo septiembre 2004 - agosto 2005. . . . .	92
7.4. Datos de entrada de balance de masa mensuales medidos en las balizas en el glaciar Zongo para el periodo septiembre 2005 - agosto 2006. . . . .	93
7.5. Rangos de los parámetros TF y SRF tomados de la literatura. . . . .	94
7.6. Parámetros óptimos utilizados para ocho estacas en la simulación de ETI para el periodo 2004-2005. . . . .	94
7.7. Parámetros óptimos utilizados para 17 estacas en la simulación de ETI para el año 2005-2006. . . . .	95
7.8. Parámetros óptimos utilizados para la simulación de SETI para los años 2004-2005. .	96
7.9. Parámetros óptimos utilizados para la simulación de SETI para el año 2005-2006 .	97
A.1. Datos de entrada medidos en las estaciones en el glaciar Zongo, para el periodo 2004 a 2005. . . . .	139
A.2. Datos de entrada medidos en las estaciones en el glaciar Zongo, para el periodo 2005 a 2006. . . . .	148

A.3. Combinación de valores autocalibrados de TF y SRF con sus respectivos errores	
para la estaca 2G para el parámetro topográfico Combinado, para el periodo 2004	
a 2005. . . . .	173

# Capítulo 1

## Generalidades.

### 1.1. Introducción

El retroceso de los glaciares en la región ha sido uno de los cambios más notables en los Andes tropicales durante los últimos años, siendo mayor el retroceso en los glaciares más pequeños que los más grandes. Los procesos de balance de masa en glaciares andinos se debe a diferentes factores, uno de los más representativos es el incremento de la temperatura durante los últimos años. Estos indicios de calentamiento son consistentes con otros tipos de registros realizados a lo largo de toda la Cordillera Americana. Por ejemplo, imágenes de satélites de la Montaña Sajama (Bolivia, 6542 m) en los Andes, sugiere que la vegetación se ha desplazado a zonas más altas en los últimos 30 años. Considerando la relación que se sugiere entre la ODP <sup>1</sup> y las temperaturas en los Andes tropicales, los efectos regionales del calentamiento global podrían agravarse en un futuro próximo, cuando la ODP se desplace de una fase negativa a una positiva (Kohler et al., 2010).

El conocimiento de los índices de fusión de la superficie de la nieve y el hielo es importante para la evaluación y el manejo correctos de los recursos hídricos (Hamlet and Lettenmaier, 1999) y del balance de masa glaciar. Las tasas de fusión de la superficie se pueden calcular por medio de dos enfoques diferentes: modelos matemáticos conceptuales, basados en procesos físicos y empíricos.

El primero puede definirse como un modelo en el que cada uno de los flujos de energía son relevantes en la superficie del glaciar, se calcula a partir de cálculos basados en la física utilizando mediciones directas de las variables meteorológicas necesarias, y la tasa de fusión se calcula como la suma de los flujos individuales. Los modelos empíricos de temperatura se puede definir como un modelo en el que la tasa de fusión se calcula a partir de una fórmula empírica en la que la temperatura del aire es la única variable de entrada medida, aunque las variables de entrada adicionales, como la radiación de onda corta entrante, pueden incorporarse mediante parametrizaciones basadas en el tiempo y ubicación.

Los modelos de índice de temperatura se han utilizado ampliamente para aplicaciones tanto glaciológicas como hidrológicas debido a sus menores requerimientos de datos en comparación con los modelos más sofisticados de balance de energía. Sin embargo, su aplicabilidad generalmente se restringe a la simulación de las tasas de fusión diaria o resolución gruesa, y en una manera agrupada

---

<sup>1</sup>ODP: Oscilación Decadal del Pacífico. La ODP es un cambio o anomalías de la temperatura que suceden sobre el océano, mejor descrita como un patrón de variabilidad del clima continental, similar a un fenómeno del Niño de larga duración.

y semi agrupada para el cálculo de las tasas de fusión promedio en toda una cuenca. Recientemente, una creciente necesidad de simulaciones de alta resolución temporal y espacial de la velocidad de fusión (por ejemplo, (Hock, 2003)) ha impulsado numerosos intentos de combinar la precisión de los modelos de balance de energía basados físicamente con la simplicidad de los enfoques de índice de temperatura (Pellicciotti et al., 2005).

En este trabajo se propone desarrollar una modificación al modelo de índice de temperatura mejorado (ETI) (Pellicciotti et al., 2005), para analizar y evaluar el cambio que se produciría en los resultados del modelo. Considerando un nuevo enfoque se desarrollará un modelo topográfico de radiación solar para examinar la variabilidad en la radiación solar directa a lo largo de la temporada de derretimiento efectuadas sobre y alrededor del glaciar Zongo, debido al sombreado topográfico. Aplicamos el modelo al glaciar Zongo y se evaluará la sensibilidad mensual del sombreado topográfico.

Nuestros resultados muestran que el sombreado topográfico altera significativamente la posible radiación solar directa de cielo despejado recibida en la superficie del glaciar Zongo. El sombreado topográfico no sólo es un factor importante que contribuye al equilibrio energético de la superficie, sino que también influye en la respuesta de los glaciares y las estimaciones del balance de masa en el glaciar.

Las variables climáticas que se usarán en este estudio son: temperatura del aire ventilado, precipitación, radiación global, albedo, humedad relativa y velocidad del viento. Estas variables se usarán para el cálculo del balance de masa, junto con el modelo de índice de temperatura mejorado ETI (Fuchs et al., 2016), y las variables del modelo digital de elevación DEM, y variables astronómicas de la zona de estudio del glaciar Zongo.

A su vez se realizará un paquete (SETI<sup>2</sup>) desarrollado mediante el software libre y lenguaje de programación R, implementando las modificaciones al algoritmo del modelo de fusión (ETI). Esto permitirá no sólo calcular el balance de masa de un glaciar sino también será un punto inicial para la elaboración de nuevos proyectos de investigación.

## 1.2. Antecedentes

Existen algunos estudios previos en nuestro país en cuanto al análisis de escurrimiento y balance de masa para glaciares a partir de datos de temperatura del aire, precipitación, radiación global, albedo, humedad relativa y velocidad del viento a nivel diario, tales como el elaborado por Fuchs et al. (2016), el cual realizó un análisis de modelado de fusión, descarga, y balance de masa para el glaciar tropical de Zongo utilizando el modelo de índice de temperatura mejorado (ETI).

En nuestro país se realizaron múltiples investigaciones en cuanto al análisis de los glaciares en los Andes Bolivianos, tales como el elaborado por Wagnon et al. (1999b), realiza un análisis de la esorrentía del glaciar Zongo, Bolivia que muestra una variabilidad estacional apreciable, con bajas descargas en la época seca (mayo a agosto) y valores altos en la época húmeda (octubre a marzo). Desde 1996, se han realizado mediciones de balance energético en las proximidades de la línea de equilibrio (5150 m s.n.m.) en el glaciar Zongo así como comparaciones con el flujo de descarga proglacial registrados en la estación hidrométrica principal. Como conclusión central de estos estudios, se sabe que, la energía entrante durante todo el año es constante, sin grandes variaciones, y la

<sup>2</sup>SETI: Modelo de Índice de Temperatura Mejorado para Superficies de Relieve Accidentado y Complejo.

humedad controla el equilibrio de esta energía durante la acumulación entre sublimación y fusión.

Wagnon et al. (2001), realiza un análisis durante los eventos cálidos de El Niño-Oscilación Sur (ENSO), en los cuales los glaciares de los trópicos exteriores generalmente experimentan un déficit de precipitación, un incremento de temperatura del aire y un balance de masa fuertemente negativo. En el glaciar Zongo, Bolivia, esto fue particularmente sorprendente durante el vigoroso evento El Niño 1997/98, uno de los más fuertes del siglo, y el cual resultó en una profundidad anual de esorrentía dos tercios más grande de lo normal. Se comparó el balance de energía en el glaciar entre dos ciclos contrastantes, 1996/97 (año de la Niña) y 1997/98 (año del Niño). Debido a los  $1.3^{\circ}\text{C}$  de incremento de la temperatura promedio anual, el flujo de calor sensible incrementa ligeramente de  $6.1$  a  $9.8 \text{ W m}^{-2}$ . Durante el año de El Niño, la sublimación es reducida, dejando más energía disponible para el derretimiento. Este permanente aumento de la radiación neta de todas las ondas está relacionada con la disminución del albedo debido al déficit de precipitación.

También se tiene otro estudio realizado por Sicart et al. (2001), realiza un análisis de la radiación de onda larga para ambientes de montaña de albedo<sup>3</sup> alto que proporciona un gran aumento de derretimiento en las superficies de nieve, bajo cielos nublados. Examina el control atmosférico de la radiación de onda larga para el glaciar Zongo, sobre un año entero. La emisión de la nube mejora la emisividad del cielo despejado hasta el 55 % aproximadamente. Por lo que respecta las correlaciones parciales muestran que las emisiones de nube en altas montañas controlan las emisiones de variaciones de radiación de onda larga, mas lejos que la emisividad del cielo despejado y temperatura de la emisividad atmosférica.

Sicart et al. (2005), realiza un análisis de glaciares tropicales que incluyen la investigación de la variabilidad climática en regiones pobremente documentadas de grandes cambios de energía en la superficie atmosférica. Este estudio examina el flujo de energía en la superficie del glaciar Zongo Bolivia, para identificar las variables atmosféricas que controlan el derretimiento. Como conclusión de este estudio se sabe que durante el núcleo de la época húmeda, de Enero a Abril, las magnitudes de los flujos de radiación netos de onda corta y neta de onda larga se redujeron con frecuentes nubes y nevadas, de modo que la energía de fusión fue moderada. En la época seca de Mayo a Agosto, la energía de fusión fue pequeña debido a las pérdidas de energía esencialmente en la radiación de onda larga, pero también en la sublimación.

Hock (2003), realiza un análisis de los modelos de índice de temperatura o grado día, que se basan en una relación entre la nieve o el hielo derretido y la temperatura del aire generalmente expresada en forma de temperaturas positivas. Dado que la temperatura del aire en general es el dato más fácilmente disponible, tales modelos han sido el método más utilizado para los cálculos de derretimiento de hielo y nieve para muchos propósitos, como el modelado hidrológico, el modelado dinámico del hielo o los estudios de sensibilidad climática. Proporciona una descripción general de los métodos de índice de temperatura, incluidos los entornos glaciares, y analiza los avances recientes en los enfoques distribuidos que intentan tener en cuenta los efectos topográficos en terrenos complejos.

En cuanto a estudios que consideren los efectos de sombreado topográfico en el balance de

---

<sup>3</sup>Albedo: El término albedo se refiere a la cantidad de energía solar que se refleja en la Tierra y aterriza en el espacio



masa de un glaciar en Bolivia, no existen. Sin embargo existen algunos estudios que consideran el sombreado de la topografía en el ámbito internacional, se citan a continuación:

- **Corripio (2003)** en este estudio realiza un análisis de los parámetros del terreno derivados de los modelos digitales de elevación (DEM), como el gradiente de pendiente, el aspecto y el área de superficie de una celda, se representan como un vector normal a la superficie y se calculan utilizando la unidad de área mínima del DEM, que está encerrada entre cuatro puntos de datos. El sombreado se calcula escaneando la proyección de las celdas en un plano de iluminación solar perpendicular a la dirección del Sol. Este estudio del algoritmo se realizó usando una superficie sintética y ejemplos reales dados por el macizo glacial Mont Blanc de los Alpes Franceses.
- **Olson and Rupper (2019)** se centra en mejorar la comprensión actual sobre el impacto del relieve sombreado de los glaciares de la Alta Montaña de Asia (HMA), realiza este análisis en dos glaciares Satluj y Nianchu. El sombreado topográfico, que incluye tanto el relieve sombreado como las sombras proyectadas, juega un papel fundamental en la determinación de la radiación solar directa sobre el hielo glacial. Desarrolló un modelo topográfico de radiación solar para examinar la variabilidad en la irradiancia a lo largo de la temporada de fusión del glaciar debido al sombreado topográfico y la pendiente y el aspecto combinados.

Sus resultados muestran que el sombreado topográfico altera significativamente la posible radiación solar directa de cielo despejado recibida en la superficie para los glaciares de los valles en HMA, particularmente para los glaciares orientados al norte y al sur. Además, obtuvo que el sombreado puede ser extremadamente impactante en la zona de ablación. Debido a la importancia que contribuye al equilibrio energético de la superficie de los glaciares.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

Proponer un modelo numérico simple para estimar el balance de masa mensual en glaciares con topografía compleja, considerando el efecto de la pendiente, orientación y sombreado diario. Aplicar y evaluar este modelo en el glaciar Zongo. Estas modificaciones podrían afinar las estimaciones de las variables mencionadas para estudios hidro-glaciológicos.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Recopilar datos meteorológicos.
- Estimar y analizar los parámetros principales del modelo: “*factor de temperatura (TF)*” y “*factor de radiación de onda corta (SRF)*”, para el glaciar Zongo.
- Estimar el balance de masa mensual con el modelo original de índice de temperatura mejorado (ETI) durante el periodo de estudio (2004-2006) para el glaciar Zongo.
- Codificar un programa que calcule el balance de masa mensual, y realizar un análisis de resultados del modelo de índice de temperatura mejorado (ETI) y el propuesto modelo de

índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) para el glaciar Zongo.

## 1.4. Justificación General

En este trabajo se propone desarrollar una modificación al modelo de índice de temperatura mejorado (ETI) (Pellicciotti et al., 2005), para analizar y evaluar el cambio que se produciría en los resultados del modelo, que podría influir en la respuesta en las estimaciones de balance de masa en el glaciar. Considerando un nuevo enfoque se desarrolla un modelo topográfico de radiación solar para examinar la variabilidad en la radiación solar directa a lo largo de la temporada de derretimiento efectuadas sobre y alrededor del glaciar Zongo, debido al sombreado topográfico que incluye el relieve sombreado, pendiente y aspecto, sombras proyectadas y el combinado de todas las mencionadas.

Las variables climáticas que se usarán en este estudio son: temperatura del aire ventilado, precipitación, radiación global, albedo, humedad relativa y velocidad del viento. Estas variables se usarán para el cálculo del balance de masa, junto con el modelo de índice de temperatura mejorado ETI (Fuchs et al., 2016), y el modelo digital de elevación DEM, y variables astronómicas de la zona de estudio del glaciar Zongo.

Por último se codificó el modelo SETI, mediante el software libre, lenguaje de programación R. Implementando las modificaciones al algoritmo del modelo de fusión (ETI). Esto permitirá no sólo calcular el balance de masa de un glaciar sino también será un punto inicial para la elaboración de nuevos proyectos de investigación.

## 1.5. Metodología

En este estudio se aplica el modelo de índice de temperatura mejorado ETI implementando nuevas metodologías en el algoritmo para topografías complicadas en el glaciar Zongo. Este modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI se aplica y evalúa respecto al modelo ETI, considerando además la radiación solar en superficies de relieve accidentado y complejo efectuadas sobre y alrededor del glaciar Zongo.

Los datos de entrada medidas en las estaciones en el glaciar Zongo son datos clave para este modelo, como ser: la temperatura del aire, precipitación, radiación global, albedo, humedad relativa, velocidad del viento y el sombreado topográfico sobre el glaciar que se obtienen a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de Zongo y las variables astronómicas de la zona de estudio del glaciar. El desempeño del modelo SETI para representar los procesos hidro-glaciológicos, se analiza y evalúa descriptiva y comparativamente respecto a mediciones y resultados del modelo ETI.

En este trabajo, se identifica a la radiación global ( $G$ ) como un factor influenciado por la topografía del glaciar por lo cual se considera un nuevo enfoque y se desarrolla un modelo topográfico de radiación solar para examinar la variabilidad en la radiación solar directa a lo largo de la temporada de derretimiento efectuadas sobre y alrededor del glaciar Zongo, debido al sombreado topográfico.

Sin embargo, el análisis de  $G$  es complejo por la gran cantidad de ecuaciones requeridas. Este problema será resuelto utilizando cálculos numéricos.

Es útil modelar explícitamente dichos procesos físicos termodinámicos con el mayor detalle posible. Los datos recopilados en el glaciar Zongo representan una excelente oportunidad para esto.

La mejora presentada en este modelo es una modificación del modelo de índice de temperatura mejorado de Pellicciotti et al. (2005), el modelo de derretimiento, escorrentía y balance de masa de un glaciar tropical en los Andes Bolivianos utilizando un modelo mejorado de índice de temperatura de Fuchs et al. (2016) con la investigación de Olson and Rupper (2019) “Impactos del sombreado topográfico en la radiación solar directa para glaciares de valle en topografía compleja”. Se utilizarán los mismos métodos pero incluyendo una modificación que permita analizar la variabilidad en la radiación solar directa a lo largo de la temporada de derretimiento efectuadas sobre y alrededor del glaciar Zongo debido al sombreado topográfico que incluye el sombreado proyectado, relieve sombreado, pendiente y aspecto y la combinación de los parámetros topográficos ya mencionados.

Los pasos para implementar al nuevo modelo son los siguientes:

#### PASO 1: RECOPIACIÓN DE DATOS.

- Obtener datos de las estaciones del glaciar Zongo como ser las variables climáticas: temperatura del aire ventilado, precipitación, radiación global, albedo, humedad relativa, velocidad del viento, para los años 2004-2006 existentes en el glaciar Zongo.
- Recopilar información como ser: la ubicación y el tamaño del glaciar y los modelos de elevación digital (DEM) para el glaciar Zongo de 2004-2006.

#### PASO 2: CODIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS MODELOS ETI Y SETI.

- Se implementa en código R, el algoritmo del modelo matemático para ETI y SETI. Con estos algoritmos construidos se procede a la modelación del derretimiento y al cálculo de balance de masa para ambos modelos. El nuevo modelo SETI toma en cuenta un factor influenciado por el sombreado topográfico que incluye el relieve sombreado, pendiente y aspecto, sombras proyectadas y el combinado de todas las mencionadas sobre y alrededor del glaciar Zongo.
- Se aplican los modelos ETI Y SETI para el glaciar Zongo para el periodo 2004-2006.

#### PASO 3: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS ETI y SETI.

- Calibración.- La calibración de los parámetros “*factor de temperatura (TF)*” y “*factor de radiación de onda corta (SRF)*” en el modelo ETI y SETI, será realizada mediante un proceso de calibración mediante un algoritmo de aproximación de los parámetros de factor de temperatura y factor de radiación de onda corta entrante (TF y SRF) respectivamente que permiten ajustar la salida del modelo para el caso del glaciar Zongo. El error absoluto medio (MAE) fue seleccionado como la función objetivo para que los parámetros óptimos produjeran el valor mínimo, teniendo en cuenta el rango físico aceptable de los parámetros provistos por Pellicciotti et al. (2008) y Carezzo et al. (2009).

- Validación.- Los parámetros calibrados serán validados hasta obtener el valor mínimo del error absoluto medio (MAE) y el mejor ajuste entre el balance de masa acumulado observado y el simulado para los años 2004-2006, considerando los rangos recomendados por (Pellicciotti et al., 2008) y Carenzo et al. (2009).

#### PASO 4: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE ÍNDICE DE TEMPERATURA ETI Y SETI.

- Se comparan los resultados obtenidos del modelo SETI con el modelo de índice de temperatura mejorado ETI (Pellicciotti et al., 2005), para así evaluar el desempeño del nuevo modelo en comparación con el modelo ETI y verificar si el nuevo factor que considere el sombreado topográfico interviene en los resultados en el balance de masa.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema de la metodología que se va a seguir en el proyecto.

## 1.6. Alcance y limitaciones

### 1.6.1. Alcance

El alcance del presente estudio, es calcular el balance de masa para glaciares tropicales, especialmente aquéllos que presentan topografía montañosa, caso de estudio glaciar Zongo. Además, se presenta una modificación al modelo de índice de temperatura mejorado ETI que incluya un factor influenciado por el sombreado de la topografía en el glaciar.

El periodo de estudio que abarcará este proyecto es de dos años hidrológicos (Septiembre de 2004 a Agosto de 2006).

En el desarrollo del proyecto se realizan las siguientes tareas:

- Recopilar datos a nivel diario de la precipitación, temperatura del aire ventilados, albedo, radiación global, humedad relativa y velocidad del viento y el sombreado topográfico que se obtiene del Modelo Digital de Elevación (DEM) de resolución de 30 m para Zongo y las variables astronómicas de la zona de estudio del glaciar, además se analizarán los factores de “*factor de temperatura (TF)*” y “*factor de radiación de onda corta (SRF)*” para el modelo.
- Aplicar propuestas del conjunto de parámetros óptimos utilizados para ejecutar (SETI).
- Calcular el balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado (ETI) y el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) y los parámetros TF y SRF calibrados durante el período 2004-2006.
- Aplicar el programa que calcule el balance de masa mensual, mediante las herramientas del lenguaje de programación R.

Por lo tanto, se espera alcanzar lo siguiente:

Obtener el mejor ajuste entre el balance de masa acumulado observado y simulado para los años 2004-2006 y mostrar que el sombreado topográfico produce un cambio significativo en el balance de masa. Considerando los rangos recomendados para los parámetros calibrados “*factor de temperatura (TF)*” y “*factor de radiación de onda corta (SRF)*” y analizar si el sombreado topográfico,

tanto el relieve sombreado, sombras proyectadas, pendiente, aspecto y la combinación de todas las mencionadas, influyen o juegan un papel fundamental en el balance de masa de un glaciar. Sin embargo, el sombreado se ha simplificado demasiado o se ha incorporado incorrectamente en los modelos de balance de energía de superficie en algunos estudios anteriores (Olson and Rupper, 2019). Debido al importante papel que juegan los glaciares en nuestro planeta, son los indicadores más sensibles al cambio climático como es el caso del efecto invernadero.

### 1.6.2. Limitaciones

El estudio se realiza únicamente para dos años hidrológicos 2004-2006, esto se debe a la disponibilidad de datos en esos años en el glaciar, los cuales eran escasos motivo por el cual se tomaron dos años para el estudio. Actualmente están disponibles datos meteorológicos para un periodo más largo en la página de GLACIOCLIM (<https://glacioclim.osug.fr/contact-acces-23>), gracias a este avance se pueden evaluar los procesos hidro-glaciológicos con modelos de periodos más largos. En nuestro caso no conviene usar un periodo largo porque estamos comparando los resultados de dos modelos con la misma cantidad de años, para que sean comparables dos modelos deben tener la misma característica de tiempo. En un futuro para profundizar más se podrían usar datos más largos como por ejemplo 10 años y de esta serie de datos se pueden usar siete años para la calibración y los restantes tres años para la validación del modelo. En este caso como evaluamos los modelos sobre dos periodos hidrológicos, la siguiente tarea es de ampliar el periodo de simulación y evaluar ambos modelos contra los datos observados, para la validación de los mismos.

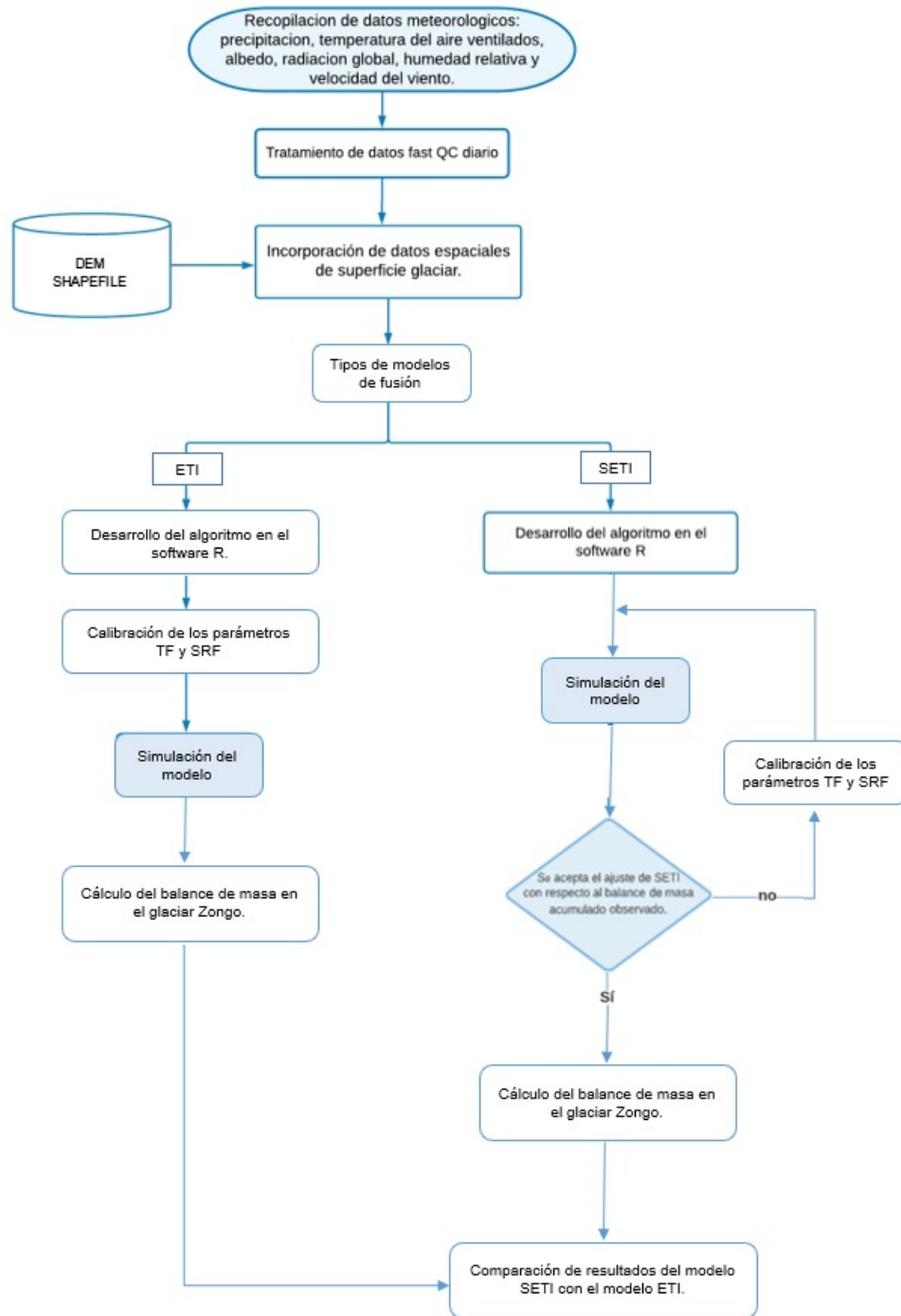


Figura 1.1: Esquema que ilustra los pasos del proyecto para calcular el balance de masa en el glaciar Zongo.

## Capítulo 2

# Características Generales del área de estudio

### 2.1. Área de Estudio.

Bolivia se encuentra situada en el centro de América del Sur entre  $70^{\circ}\text{O}$ ,  $10^{\circ}\text{S}$  y  $57.5^{\circ}\text{O}$ ,  $22.5^{\circ}\text{S}$  (Figura 2.1). Su territorio cubre una amplia gama de elevaciones que se extienden desde las alturas de la Cordillera de los Andes en el oeste, hasta las llanuras bajas de la cuenca del Amazonas en el este (Fuchs, 2013). Las principales ciudades de la región occidental dependen de los glaciares andinos como fuentes de abastecimiento de agua potable, generación de energía, también en actividades culturales, económicas y turismo.



Figura 2.1: Ubicación de Bolivia en América del Sur. Fuente: ESRI, Google Earth.

Este glaciar se encuentra entre los glaciares de referencia en los trópicos en términos de mediciones de campo de balance de masa (Soruco et al. (2009); Zemp et al. (2011)) y meteorología (Wagnon et al., 1999b). Por lo tanto este glaciar constituye un sitio ventajoso para las pruebas de modelos y calibración de parámetros, para así evaluar la aplicabilidad del modelo.

## 2.2. Glaciar Zongo (Bolivia)

El glaciar tropical Zongo se encuentra ubicado en la región del macizo Huayna Potosí en la Cordillera Real, Bolivia ( $16^{\circ}15'S$ ,  $68^{\circ}10'O$ ), (Figura 2.2), a 30 Km al norte de La Paz, entre la meseta seca del Altiplano en el oeste y la cuenca húmeda del Amazonas en el este.

Se extiende desde 4900 a 6000 m s.n.m. Figura 2.3, cubre un área de  $1.90 \text{ km}^2$  y es parte de una cuenca de drenaje de  $3.50 \text{ km}^2$  orientada al sureste (Fuchs, 2013).



Figura 2.2: Ubicación geográfica de los glaciares Zongo y Huayna Potosí Oeste en la Cordillera Real (izquierda) y en el Macizo Huayna Potosí (derecha). Fuente: ESRI, Google Earth.

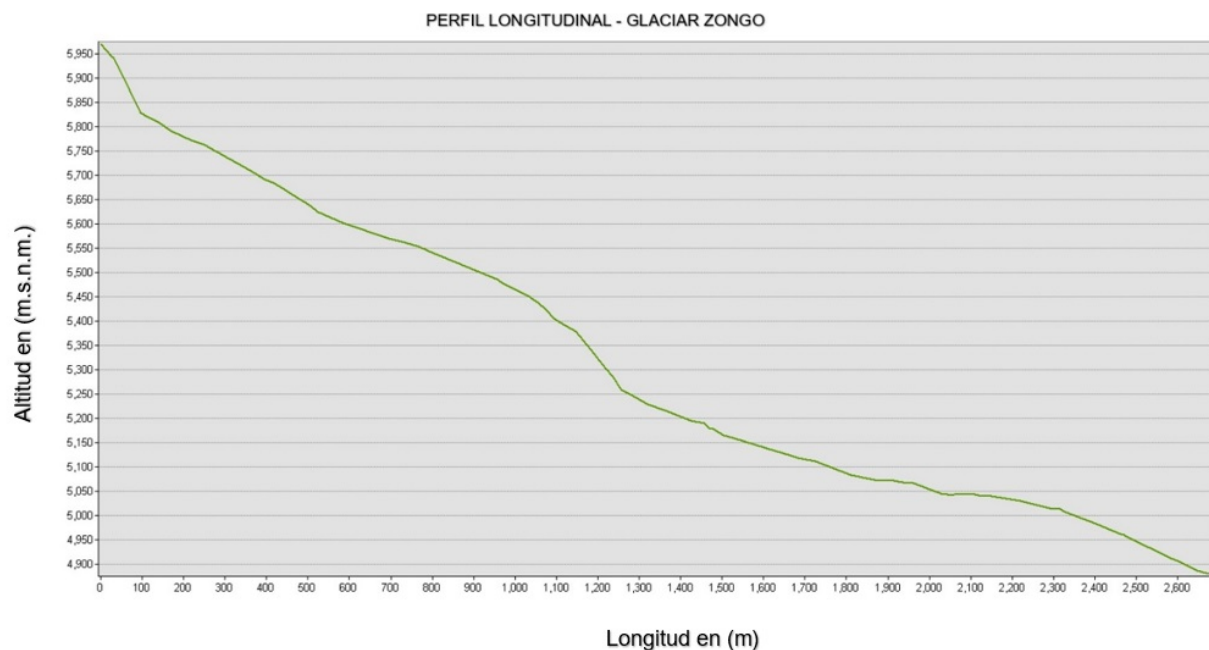


Figura 2.3: Perfil Topográfico del glaciar Zongo en base a datos de satélite ASTER GDEM. Fuente: Elaboración Propia.



## 2.3. Características Físicas.

La mayor parte de la precipitación proviene de la cuenca amazónica, este glaciar templado tipo valle tiene 3 Km de longitud se extiende por una pendiente de barlovento que da a la cuenca del Amazonas (Sicart et al., 2011). A mediados del siglo XX la tendencia del retroceso del glaciar Zongo ha sido diferente a la de los otros glaciares tropicales. Este glaciar tiene una altitud máxima superior a los 5500 m s.n.m. y, por lo tanto, todavía tiene una gran zona de acumulación (Rabatel et al., 2013).

A principios de la década de 1990, el IRD<sup>1</sup> francés, en asociación con sus homólogos bolivianos, inició un programa de observación en este glaciar. Además forma parte de una red de monitoreo permanente llamada GLACIOCLIM<sup>2</sup> y un proyecto conjunto internacional llamado GREAT ICE<sup>3</sup> (Chevallier et al. (2011); Rabatel et al. (2013)).

Se realizan mediciones de la ablación a nivel mensual y de la acumulación a nivel anual para cada año hidrológico (septiembre-agosto). Paralelamente, se han realizado estudios de teledetección utilizando fotografías aéreas e imágenes satelitales para reconstruir los cambios en el volumen, el área de superficie y la longitud desde mediados del siglo XX. El glaciar Zongo presenta dos estaciones meteorológicas automáticas (AWS, Figura 2.4) ubicadas en la morrena y en el glaciar a 5050 m s.n.m. registran a intervalos de 30 minutos las temperaturas del aire ventiladas y sin ventilación, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, radiación de onda corta descendente y reflejada, y radiación de onda larga entrante y emitida. Las precipitaciones, la temperatura, la humedad y la radiación de onda corta más allá de la influencia térmica del glaciar son registradas por una estación meteorológica a 4750 m s.n.m., aproximadamente a 1 km del frente del glaciar (Sicart et al., 2011). Un sensor de presión de agua instalado en la estación hidrométrica a 4830 m s.n.m. mide la descarga de la corriente proglacial.

La cuenca de drenaje delimitada por la estación hidrométrica se subdividió en zonas de elevación. La Tabla 2.1 muestra los rangos, el área, la elevación media y la relación por área cubierta por hielo al área total de cada zona.

<sup>1</sup>Institut de Recherche pour le Développement - IRD: El Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) es un organismo francés de investigación, original y único en el paisaje europeo de la investigación para el desarrollo. El IRD centra sus investigaciones, desde hace más de 65 años, en las relaciones entre el hombre y su entorno en África, el Mediterráneo, Latinoamérica, Asia y en el Ultramar tropical francés. Sus actividades de investigación, de formación y de innovación tienen como objetivo contribuir al desarrollo social, económico y cultural de los países del Sur.

<sup>2</sup>GLACIOCLIM tiene como objetivo estandarizar y perpetuar una red de mediciones en un conjunto de glaciares de referencia que permite documentar el impacto del cambio climático en zonas climáticas contrastantes.

<sup>3</sup>Programa Great Ice: Glaciares y recurso de agua en los Andes Tropicales, indicadores de cambios en el ambiente. Este programa viene de la iniciativa del IRD en 1991 de promover el monitoreo de los glaciares de los Andes tropicales.

Tabla 2.1: Zonas de elevación y área cubierta de glaciares (GCA) del glaciar Zongo. Las elevaciones son en m s.n.m.

Zona	Elevacion	Area ( $km^2$ )	Elevación Media	Área del glaciar ( $km^2$ )	GCA (%)
A	4780-5100	0.89	4996.97	0.38	42
B	5100-5300	0.86	5188.46	0.36	41
C	5300-5500	0.71	5397.80	0.42	59
D	5500-5700	0.71	5593.80	0.50	70
E	5700-6072	0.34	5308.00	0.26	76
En toda la cuenca		3.51	5308.35	1.92	54

Fuente: [Fuchs et al. \(2016\)](#)

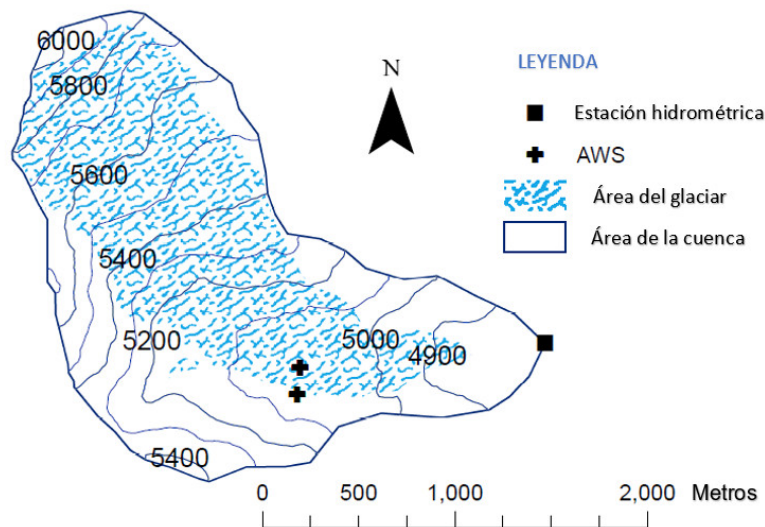


Figura 2.4: Mapa del glaciar Zongo que muestra las posiciones de las estaciones meteorológicas automáticas (AWS) y la estación hidrométrica. Fuente: [Fuchs \(2013\)](#)

# Capítulo 3

## Fundamento Teórico

### 3.1. Glaciar

Un glaciar es una masa de hielo que se va formando con el transcurso del tiempo en la superficie de la tierra a causa de la acumulación sucesiva de precipitación sólida (nieve, granizo, escarcha) (Cogley et al. (2011), Rivera et al. (2016), Kargel et al. (2014)).

La formación de un glaciar está relacionada con la acumulación de nieve a gran altura, longitud y las condiciones climáticas locales. Los glaciares así definidos pueden adquirir numerosas formas, como en aquellas partes del planeta donde la temperatura es baja y la tasa de precipitación es mayor que la de fusión de la nieve/hielo (estas condiciones establecen una región imaginaria llamada “línea de nieve”). Los lugares propicios para la formación de glaciares son las regiones polares y montañas de gran altitud. Globalmente se ha observado que la línea de nieve se encuentra a nivel del mar en los polos, 1200 m por Escandinavia, 2500-3000 m por los Alpes y 5000-6000 por las regiones ecuatoriales (Singh, 2001).

### 3.2. Clasificación de los glaciares

La clasificación de glaciares tiene diferentes criterios basados en su geomorfología como los de roca y la latitud como los tropicales, lo que pone en evidencia la diversidad glaciar. Cada tipo de glaciar representará desafíos particulares para su estudio, el que ha de realizarse con diferentes técnicas y precisiones. Se clasifican en mantos, casquetes de hielo, glaciares de piedemonte, glaciares de valle, glaciares de cráter, glaciares de montaña, glaciares de circo y glaciares rocosos.

#### 3.2.1. Casquetes de hielo continental o Islandis.

Es una gran masa de hielo que cubre un continente como Antártica o grandes extensiones como Groenlandia (Figura 3.1), donde la extensión del hielo no está totalmente controlada por la topografía de la corteza que subyace al hielo. Este tipo de glaciar se caracteriza por ser más activo en sus bordes y a lo largo de corrientes de hielo. Las partes más altas y abombadas se denominan “domos”, estos se caracterizan por su escasa pendiente, gran altura y flujo de hielo muy limitado. Se trata de cuerpos de hielo fríos que en general presentan escasa alimentación, excepto en algunos márgenes donde la acumulación es mayor (Rivera et al., 2016).



Figura 3.1: Casquete de hielo continental en Antártica Occidental. Fuente: (Rivera et al., 2016).

### 3.2.2. Glaciares de piedemonte.

Son glaciares enclavados en la Cordillera pero cuya alimentación es suficientemente abundante como para permitir que una lengua penetre el Pie de Monte, descargando su caudal de hielo, en forma de abanico divergente (Figura 3.2). También pueden ser generados por varias lenguas glaciares que convergen en una zona más plana, formando una lengua terminal en forma de abanico de grandes dimensiones. Estos se distinguen en las siguientes partes:

- La parte superior presenta cuencas compuestas.
- La lengua propiamente dicha, encauzada en un valle con distintas longitudes.
- El lóbulo (pie expandido), que es su elemento característico, el cual sale de la montaña y forma un semi-arco similar a un gran cono de deyección.

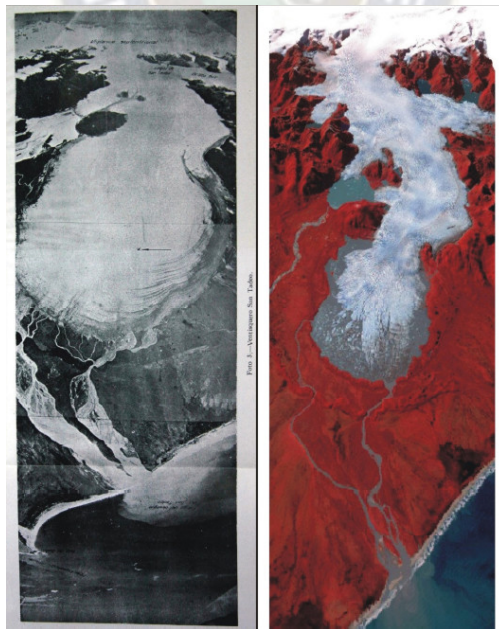


Figura 3.2: Glaciar de Piedemonte. Glaciar San Quintín, Campo de hielo Norte, Chile. Izquierda; foto aérea del vuelo Trimetrogon 1944/1945. Derecha; Imagen Satelital Aster del año 2003. Fuente: (Rivera et al., 2016).

### 3.2.3. Glaciares de valle.

Se refiere a un glaciar que cubre parcialmente o completamente el valle de una montaña. Se caracterizan por tener una o más cuencas de acumulación, ubicadas en subcuencas o circos, las cuales confluyen en un valle, más largo que ancho, el cual permite el flujo de hielo en función de la pendiente. A éstos se les denominaba glaciares Alpinos, por ser la forma típica de varios glaciares de los Alpes (Rivera et al., 2016).

### 3.2.4. Glaciares de cráter.

Son aquellos que ocupan una depresión topográfica, rodeada de un cordón montañoso, que impide la evacuación superficial del hielo acumulado, el cual fluye hacia el centro de la depresión y pierde masa por ablación superficial y también gracias al calor geotérmico en los conos y cráteres que los contienen (Figura 3.3) (Rivera et al., 2016).



Figura 3.3: Cráter del Volcán Lonquimay, Chile 1989. Fuente: Rivera et al. (2016).

### 3.2.5. Glaciares de montaña.

Los glaciares de montaña son uno de los componentes de la criósfera<sup>1</sup> y son conocidos por su alta sensibilidad al cambio climático. Dada su rapidez de respuesta a estos cambios, se los podría calificar de “centinelas del clima” (Francou et al., 2013). Estos glaciares están localizados en las partes altas de la cordillera, con formas variables y su zona de acumulación es bien definida, como ejemplo lo constituye el glaciar Zongo en Bolivia (Figura 3.4) (Rivera et al., 2016).



Figura 3.4: Glaciar de montaña. Glaciar Zongo, Bolivia. Fuente: Alvaro Soruco.

<sup>1</sup>Criósfera: Se refiere a las regiones de la Tierra donde el agua se encuentra sobre todo en forma sólida, como en los glaciares, el permafrost, la banquisa, los mantos nevosos perennes y estacionales.

La sensibilidad de los glaciares de montaña al clima es más fuerte cuando éstos son “templados”, es decir, que la totalidad de su hielo está a temperatura de fusión: un aporte mínimo de energía es entonces suficiente para causar el cambio de fase, o sea para convertir el hielo o la nieve en agua. La mayoría de los glaciares andinos entran en esta categoría, a excepción de las partes que superan los 5800/6000 m de altura, que generalmente son glaciares “fríos” (Francou et al., 2013).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC<sup>2</sup>) señaló el papel de los glaciares de montaña como indicadores clave del cambio climático reciente (Lemke et al., 2007).

### 3.2.6. Glaciares de circo.

Son aquellos que ocupan una depresión de carácter semicircular generada por erosión glacial, la cual es rodeada por flancos montañosos con mucha pendiente que culminan en cumbres o cordones tipo “aretas”. Una vez que los glaciares de circo han retrocedido (o desaparecen), estas depresiones son usualmente ocupadas por un lago, el cual es embalsado por un umbral rocoso o quiebre de pendiente por donde salía la lengua glacial en forma de cascada de hielo (Rivera et al., 2016).

### 3.2.7. Glaciares rocosos.

Los glaciares de roca son como una masa grande de fragmentos de roca y otros materiales más finos en forma de lengua de escombros congelados que se asemejan a un pequeño glaciar que contienen hielo intersticial, lentes de hielo o un núcleo de hielo (Kotlyakov and Komarova, 2006). Se localizan más en montañas áridas y semiáridas y localmente forman elementos de almacenamiento significativo de agua a largo plazo en los Andes semiáridos, que se encuentran especialmente en Chile (Trombotto et al. (1999); Brenning (2005)).

El equivalente de agua estimado en los glaciares de roca chilenos es un orden de magnitud mayor que en los Alpes Suizos, lo que indica su importancia local en América del Sur y respalda la necesidad de estudios en otras partes de los Andes. Es importante mejorar la comprensión de estos glaciares de roca y su abundancia, ya que se argumenta que el papel de los glaciares de roca en la prolongación del almacenamiento de agua y como fuente de agua será cada vez más importante a medida que los glaciares continúen retrocediendo (Millar and Westfall (2008); Angillieri (2009); Seligman (2009)). Se sabe que la composición interna de los glaciares de roca son variables, desde hielo puro hasta una mezcla de hielo/roca dependiendo de su origen de formación. Se estima que los glaciares de roca activos contienen un rango de entre 40 y 60% de hielo debajo de una capa superior de roca, que actúa como aislamiento para el hielo de los cambios de temperatura de baja amplitud y alta frecuencia, lo que resulta en una respuesta más lenta a fluctuaciones en el clima en comparación con los glaciares expuestos. Por lo tanto, es probable que la importancia de los glaciares de roca como fuentes de agua más robustas aumente con la recesión de los glaciares y en áreas donde los glaciares de hielo están ausentes (Rangecroft et al., 2013).

La investigación científica publicada sobre los glaciares de roca en Bolivia proviene del Cerro Caquilla (21°S) (Francou et al. (1999); Bodin et al. (2010)). Y un inventario preliminar de glaciares de rocas que mapea 79 glaciares de rocas en los altos Andes de Bolivia (Figura 3.5a). Estas

<sup>2</sup>IPCC: El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático es un organismo intergubernamental de las Naciones Unidas que se dedica a proporcionar al mundo información objetiva y científica relevante para comprender la base científica del riesgo del cambio climático inducido por el hombre, su naturaleza, política, e impactos y riesgos económicos, y posibles opciones de respuesta.

características abarcan desde 15°S hasta 22°S a lo largo de las dos cadenas montañosas de Bolivia: Cordillera Oriental y Occidental. En la Figura 3.5b se muestran ejemplos de fotografías in situ de glaciares rocosos de tres regiones diferentes de los Andes bolivianos. En áreas sin glaciares de hielo, como a lo largo de la Cordillera Occidental entre 19°S y 22°S, los glaciares de roca son abundantes, lo que sugiere que pueden ser importantes para los suministros de agua locales, sin embargo, se requiere más investigación.

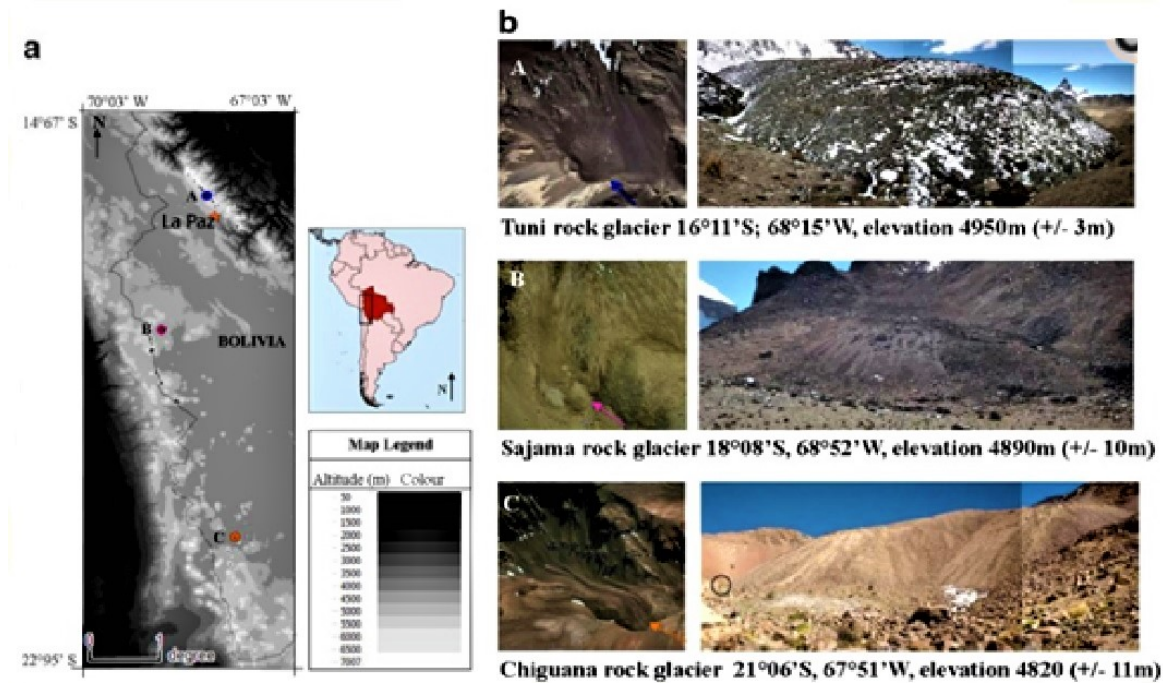


Figura 3.5: a. Mapa de glaciares de roca a lo largo de los Andes bolivianos con tres ejemplos de ubicaciones de glaciares de roca con la etiqueta A, B y C (que se muestran en b). El recuadro de color muestra la región de estudio a escala continental. El mapa se crea utilizando mosaicos del Modelo de elevación digital global de ASTER. b Las capturas de pantalla de Google Earth y las correspondientes fotografías in situ de los glaciares de roca de ejemplo visitados en julio y agosto de 2012. Los glaciares de roca que se muestran son: (A) glaciar de roca Tuni; (B) glaciar de roca Sajama; (C) Glaciar de roca Chiguana, de tres regiones diferentes de los Andes bolivianos. El círculo en la fotografía C resalta a una persona, mostrando la escala del glaciar de roca que tiene alrededor de 50 m de altura en la parte final más baja del glaciar. Las flechas de colores en todas las capturas de pantalla de Google Earth son para identificar fácilmente la parte más baja de los glaciares de roca. Fuente: Rangecroft et al. (2013).

Para el presente trabajo nos interesa más bien un tipo de glaciares ubicados en zonas tropicales a los que llamamos glaciares tropicales que se encuentran ubicados en la zona tropical del globo terráqueo.

### 3.3. Glaciar Tropical

Según Kaser and Osmaston (2002) la zona tropical está definida como la intersección de tres superficies del globo terrestre: la superficie barrida por la zona de convergencia intertropical, la superficie donde la amplitud térmica diaria es superior a la amplitud térmica anual y la superficie comprendida entre los trópicos de Cáncer y Capricornio (Figura 3.6).

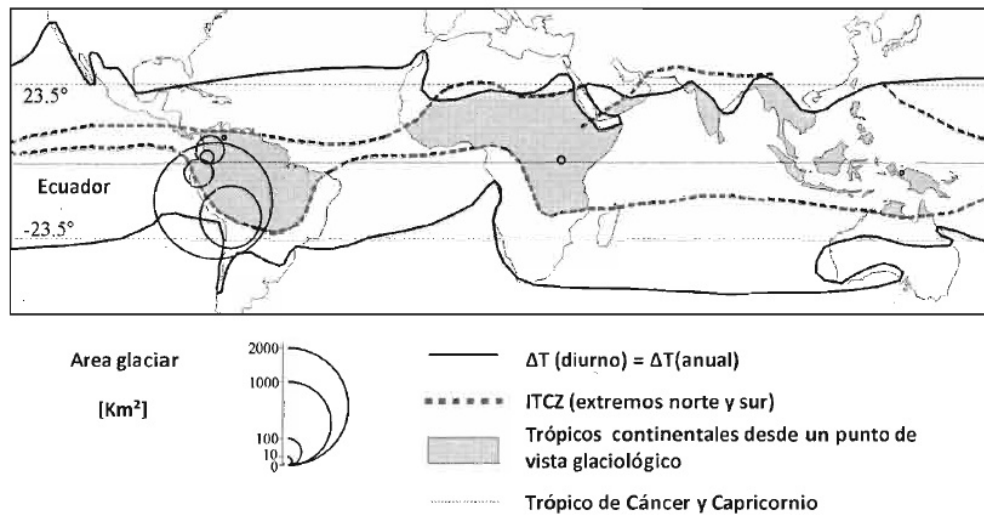


Figura 3.6: Distribución de los glaciares tropicales en el mundo. Fuente: Kaser and Osmaston (2002).

Los glaciares tropicales se encuentran ubicados en la Cordillera de Los Andes en América del Sur. La superficie total que se estimaba de los glaciares en los Andes intertropicales a principios de la década de 2000 era de alrededor de  $1920 \text{ km}^2$  (Rabatel et al., 2012), esto es muy poco cuando se los compara con otros glaciares de montaña y sobre todo con la criósfera en su conjunto. En la Tabla 3.1, se presentan las superficies y volúmenes de los diferentes componentes de la criósfera del planeta a fines del siglo 20 (Francou et al., 2013).



Tabla 3.1: Estimación de las áreas y volúmenes de los distintos componentes de la criósfera. Unidad equivalente de aumento en el nivel del mar, y parte ocupada por los glaciares tropicales.

Componentes de la criósfera	Área en $km^2$	Volumen $km^3$	Unidad equivalente de aumento en el nivel del mar
Coberturas de nieve (excepto banquisa y glaciares)	4-46 millones	500-5000	0.1-1 cm
Banquisa (o hielo de mar)	15-22 millones	19000-25000	no cambia el nivel
Permafrost	25 millones	0.4 millones	1.1 m
Antártida	12.4 millones	27 millones	65 m
Groelandia	1.8 millón	2.7 millones	7 m
Glaciares de montaña	0.43 millón	0.08 millón	0.24 m
Glaciares tropicales	1900	Menos de 100	~ 0.3 mm

La superficie total del océano es de 361 millones de  $km^2$

Fuente: [Francou et al. \(2013\)](#)

Los Andes tropicales albergan más del 99% de los glaciares tropicales del planeta y una gran mayoría se encuentra en los Andes, con una predominancia en Perú, este país concentra más del 71% de la superficie total y probablemente un mayor porcentaje del volumen, Bolivia concentra el 20%, Ecuador el 4% y Colombia-Venezuela el 4% ([Rabatel et al., 2012](#)). La Tabla 3.2 muestra la distribución por país de los glaciares en la zona tropical a comienzos del año 2000 ([Francou and Vincent \(2007\)](#)).

Tabla 3.2: Distribución de los glaciares en la zona tropical según distintas fuentes, recopiladas por Kaser (1999) y por Francou and Vincent (2007). Considerando que los años de los inventarios difieren, que algunos de ellos son antiguos y que el retroceso de los glaciares es rápido, las cifras entre paréntesis son indicativas para 2006. En Francou and Vincent (2007).

Región	Área en Km <sup>2</sup>	Porcentaje (%) de glaciares tropicales	Año de estimación
Perú	1958 (1370) <sup>1</sup>	71,1	1970 (2006)
Bolivia	562 (393) <sup>2</sup>	20,4	1975 (2006)
Ecuador	112,8 (79) <sup>3</sup>	4,1	1976 (2006)
Colombia	108,5 (76) <sup>4</sup>	3,9	1950 (2006)
Venezuela	2,7 (1,8) <sup>5</sup>	0,09	1950 (2006)
Total Andes	2744 (1920)	99,68	(2006)

<sup>1</sup>Según Kaser (1999), menos 30%

<sup>2</sup>Según Jordan (1991, datos de 1975), menos 30%

<sup>3</sup>Según Hastenrath (1981, datos de 1975), menos 30%

<sup>4</sup>Según Kaser (1999), menos 30%

<sup>5</sup>Según Kaser (1999), menos 67% (Kaser, com. Pers., 2006)

Fuente: Francou et al. (2013)

Los glaciares tropicales a pesar del pequeño tamaño que abarcan en términos de volumen a nivel mundial (equivalente a un poco menos de 0.3 mm de aumento del nivel del mar, es decir ligeramente inferior a los Alpes), son importantes por dos razones:

- Son excelentes indicadores de la tendencia climática, evolución y fluctuaciones en varias décadas, sin duda entre los mejores indicadores de la zona tropical.
- Desempeñan un papel local en la hidrología de las cuencas altas y contribuyen significativamente a los recursos hídricos.

Los glaciares tropicales son especialmente sensibles al cambio climático, debido a las condiciones climáticas en la zona tropical, la ablación ocurre durante todo el año en la parte más baja de los glaciares, lo que resulta en una respuesta de tiempo corto de la posición del término glaciar a los cambios en el balance de masa y, en consecuencia, a los cambios en el clima (Rabatel et al., 2012).

Esta característica, y la coincidencia en el tiempo de los periodos de máxima acumulación y de máxima ablación, constituyen la principal originalidad de los glaciares tropicales. Estos dos periodos son muy distintos durante el año en otros climas. Por ejemplo, en los Alpes, se suceden un periodo invernal sin ablación y solamente con acumulación, y un periodo estival con poca acumulación y sobre todo ablación. En los Trópicos, las mayores precipitaciones se dan en verano (son de origen convectivo) y por lo tanto se producen en un periodo en que el máximo de energía de origen radiativo del año llega a la parte superior de la atmósfera. Además, los glaciares están a gran altura, mayores de 5000 m en una atmósfera muy tenue, donde las temperaturas se mantienen bajas (negativas), en las mejores condiciones ligeramente positivas. En contraste, la energía de origen

radiativo es muy fuerte debido a la latitud (el sol es casi vertical todo el año) y a la altitud (baja densidad de la atmósfera para interceptar esta energía en ausencia de nubes). Por lo tanto, el balance radiativo en el suelo (parte incidente menos parte reflejada y emitida) juega un papel importante en la ablación del hielo (Francou et al., 2013).

Los glaciares tropicales han experimentado un retroceso acelerado en las últimas décadas, lo constatan todos los observadores incluso los no especialistas. Sin embargo, para demostrarlo hay que remontarse a varios siglos atrás y reconstruir todo el proceso de des-glaciación desde el máximo glaciar. Éste, conocido a escala mundial como la “Pequeña Edad de Hielo”, se produjo en esta parte de los Andes entre mediados del siglo 17 y mediados del siglo 18. El retroceso comenzó alrededor de 1730 - 1750, por lo tanto antes que la humanidad pudiera tener una influencia significativa sobre el clima y su calentamiento. No obstante, la caída de los glaciares se ha acentuado fuertemente en la segunda mitad del siglo 20, especialmente después de 1976. Se puede decir que en las últimas décadas la des-glaciación tomó un ritmo acelerado, sin precedentes en los últimos tres siglos, ya que los glaciares han perdido en treinta años entre el 30 % y el 50 % de su superficie, y los más vulnerables han reducido en su cobertura glacial e incluso a la desaparición completa de los pequeños glaciares, cuyos alcances superiores se encuentran cerca de la altitud actual de la línea de equilibrio (ELA) (Francou et al., 2013).

Es importante describir el contexto climático de este retroceso mediante la definición de los procesos físicos en la superficie del hielo y destacando los procesos que explican el aumento de la ablación. Pero también es necesario tomar en cuenta los cambios ocurridos en el clima a nivel regional andino. Estamos lejos de comprender en detalle los factores que explican la reciente disminución de los glaciares andinos, pero los últimos adelantos permiten relacionar este declive con el calentamiento de la atmósfera que se produjo durante este periodo.

Esto es una preocupación seria para las poblaciones que viven en las regiones de Perú y Bolivia, donde el porcentaje de glaciares es alto. Como consecuencia, el suministro de agua de las cadenas montañosas glaciares es crucial para el consumo agrícola y doméstico, así como para la energía hidroeléctrica. Los glaciares de montaña en los Andes tropicales actúan como amortiguadores críticos contra la precipitación altamente estacional en momentos en que la lluvia es baja o incluso ausente. El continuo deterioro de los glaciares tendrá consecuencias inevitables en las cuencas glaciares y no solamente en el recurso hídrico, sino, también en los ecosistemas vinculados con estas masas de hielo (Francou et al., 2013).

Los modelos climáticos<sup>3</sup> que se basan en escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero más severas, del tipo como en el que estamos inmersos, prevén aumentos de temperatura superiores a 3 °C a finales del siglo en las zonas altas de la región andina central. Este incremento tendrá un gran impacto en los glaciares, sabiendo que su degradación durante el siglo 20 se produjo con un aumento de las temperaturas de “solamente” 1°C aproximadamente. Por lo tanto, es posible considerar la casi total desaparición de los glaciares de los Andes tropicales durante el siglo 21; sin embargo, tal predicción debe hacerse sobre la base de un estudio bien documentado y basándose en modelos de simulación sólidos (Francou et al., 2013).

---

<sup>3</sup>Modelos climáticos globales o “modelos de circulación global”, son algoritmos matemáticos que tratan de simular las relaciones complejas del clima. En el mundo científico son generalmente referidos como Modelos Generales de Circulación (GCM - Global Circulation Models). Existen modelos de circulación atmosférica (AGCMs) y oceánica (OGCMs). También pueden estar acoplados para conformar “Coupled General Circulation Models” o AOGCMs. Estos últimos forman la base para modelos sofisticados para predicciones climáticas futuras, tal como son discutidos y presentados por el IPCC.

## Reseña de la observación de los glaciares en los Andes tropicales.

Los glaciares tropicales son señalados desde el siglo XVIII por las expediciones científicas, especialmente la de los académicos franceses en el territorio actual de Ecuador, en sus trabajos geodésicos (Francou et al., 2004b). La Condamine y Bouguer, miembros de esta expedición, los identifican como “nieves eternas o masas de nieve tan viejas como el mundo”, ya que los glaciares no eran conocidos como tales por la comunidad científica en ese tiempo. El concepto de glaciar apareció en Suiza entre 1790 y 1840 bajo el impulso de H.B. de Saussure y luego de L. Agassiz. Sin embargo, sitúan los límites inferiores en ciertos macizos, lo que permite fijar la línea de equilibrio de los glaciares a 4750 metros en 1740 en el centro del Ecuador actual. Los límites de los frentes y la línea de nieve fueron medidos en Ecuador por los geólogos alemanes Reiss y Stübel entre 1869 y 1873 en unos treinta sitios. Esta operación la repitió en 1903 el geógrafo Hans Meyer, que se puede considerar como el primer glaciólogo en visitar la región, es decir, un investigador interesado en los glaciares como un verdadero objeto de estudio. Él es testigo de un retroceso vertical de los glaciares de aproximadamente 150 m, entre sus propias observaciones y las realizadas por Reiss y Stübel.

En Perú, el geógrafo W. Sievers proporcionó información bastante precisa sobre los glaciares. Evaluó en 150 - 200 m el retroceso vertical de los glaciares, entre 1880 y 1909. Pero son las expediciones austro-alemanas del Deutsch Osterreichischer Alpenverein, dirigidas por P. Borchers y luego por H. Kinzl (la primera en 1932 y las siguientes entre 1936, 1939 y 1954), las que realizan un notable trabajo topográfico sistemático en varios macizos, Cordillera Blanca, Cordillera de Huayhuash y Cordillera Huaytapayana. Este trabajo dio por resultado unos mapas al 1:200.000, 1:100.000 y 1:50.000 que representan muy correctamente las superficies glaciares y que se mantienen como referencias para conocer su extensión en el periodo 1932 - 1954. Durante los años 1950, por la necesidad de mapas nacionales, se llevaron a cabo los primeros vuelos fotogramétricos de los Institutos Geográficos Militares, que más tarde proporcionarían información cada diez años aproximadamente sobre la extensión de las zonas glaciares.

Desde 1951, los glaciares de la Cordillera Blanca son objeto de un interés particular de parte de la Corporación Peruana del Santa, una compañía del Estado para el desarrollo del potencial hidroeléctrico de la región (Márquez and Francou, 1995). Esta organización también está interesada en los lagos glaciares peligrosos cuyos desbordamientos accidentales se multiplican con la desglaciación acelerada de los años 1940 - 1951. Por la misma razón es que en 1968 se instala en Huaraz la División de Glaciología, una organización que implementa el primer programa de monitoreo sistemático de los glaciares en el marco de las actividades de la empresa Electroperú: mediciones topográficas de las lenguas, estudios fotogramétricos, estimaciones del balance de masa en las zonas de ablación de una muestra de glaciares. En la organización de estas observaciones tienen un papel protagónico dos personalidades de Huaraz, A. Ames y B. Morales Arnao, que son los primeros glaciólogos de Perú. Ellos serán apoyados, sobre todo después de la catástrofe glaciar de Yungay en 1970, por L. Lliboutry, del Laboratorio de Glaciología de Grenoble, uno de los fundadores de la glaciología física, y luego por S. Hastenrath, de la Universidad de Wisconsin en Madison. Les debemos los primeros artículos científicos sobre los glaciares de los Andes tropicales.

Los glaciares más estudiados en la Cordillera Blanca son Broggi, Uruashraju, Yanamarey, Huarapasca, Pastoruri y Cajap, así como Santa Rosa en la Cordillera del Raura. Sin embargo, la ausencia de mediciones de acumulación no permite estimar los balances de masa completos. Estaciones meteorológicas cercanas a los glaciares hacen su aparición. Desafortunadamente, los problemas políticos de Perú a comienzos de 1990 y la privatización de Electroperú quebrantan el impulso de

esta Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de Huaraz, que sin embargo mantiene las funciones de una oficina de estudios de los glaciares del país.

En Ecuador, Hastenrath (1981) publica una síntesis de los conocimientos sobre las masas de hielo que cubren los volcanes ecuatorianos, información que principalmente deriva de una base documental desde el siglo 19. Hastenrath realiza algunos estudios de campo para describir la glaciación de entonces. La línea de equilibrio de los glaciares se coloca en 1975 a 4900 - 4950 m en el sector central del país, es decir aproximadamente 200 - 250 m más alto que en 1740. Jordan (1991) hace un trabajo de inventario sistemático sobre los glaciares bolivianos, sobre la base de una cobertura de fotografías aéreas realizada para este fin. Es la obra de referencia sobre el estado de los glaciares en Bolivia para 1975. Paralelamente, este geógrafo prosigue con estudios cartográficos de glaciares en Colombia, sobre todo después de la erupción del Ruiz en noviembre 1985, y también en Ecuador.

A partir de 1974, el glaciar de Quelccaya, cerca de 44 km<sup>2</sup> en ese tiempo y con un espesor superior a los 200 m, es intensamente estudiado por L.G. Thompson y su equipo de la Ohio State University, que extrajeron varias muestras de hielo de 164 m y 154 m, hasta la parte más antigua cerca de 2000 años antes de nuestra era. Los análisis, hechos sobre la base del ratio de los isótopos 16 y 18 de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) y del polvo encontrado en el hielo, permiten identificar: 1) la Pequeña Edad de Hielo, que se terminó en 1880; 2) el calentamiento del siglo 20; 3) la evolución de las precipitaciones en varios siglos, y 4) el fenómeno El Niño. Los operativos sobre esta cumbre abren la vía a otras extracciones realizadas después por el mismo equipo en el col del Huascarán y en el Nevado Copa en la Cordillera Blanca, así como en el Sajama en Bolivia y en el Coropuna en el sur del Perú, en colaboración con el IRD. Por su lado, el IRD lleva a cabo unas extracciones de muestras en el Illimani (Bolivia) hasta el bedrock de ~140 m, en colaboración con el Paul Scherrer Institute de Berna, así como en el Chimborazo en Ecuador. Alrededor de la década de 1990 y posteriormente, el equipo del Tropical Glacier Group de la Universidad de Innsbruck, dirigido por G. Kaser, participa en varios programas en la Cordillera Blanca practicando sobre todo análisis fotogramétricos, balances de masa, balances de energía y modelización hidrológica. Un equipo del Ohio State University, dirigido por B. Mark estudia la Cordillera Blanca, sobre todo el aspecto hidrológico y los recursos hídricos, mientras que un equipo suizo de la Universidad de Zurich se centra en los riesgos de origen glaciar. En 1991, el IRD (en ese entonces ORSTOM), bajo la dirección de B. Francou y P. Ribstein, construye las bases para un sistema de observación integrado de los glaciares a nivel regional basado en glaciares instrumentados y monitoreados permanentemente. Los primeros glaciares observados son Chacaltaya y Zongo, en la Cordillera Real de Bolivia, luego en Perú en la Cordillera Blanca el Yanamarey y el Artezonzaju; en Ecuador la atención se centra en el Antisana y secundariamente en el Cotopaxi, el Chimborazo y el Carihuayrazo. El mismo sistema se repite en Colombia en el Santa Isabel (Parque los Nevados) y la Sierra Nevada del Cocuy gracias a un equipo del IDEAM de Bogotá dirigido por J.L. Ceballos. Anteriormente, tras la erupción del Nevado del Ruiz en 1985, se hizo un seguimiento del casquete de la cúspide de este volcán activo, con radar principalmente, en el marco de las actividades de Ingeominas en Bogotá (Francou et al., 2013).

### 3.3.1. Zonificación teórica de un glaciar

Un glaciar se divide en dos zonas principales a lo largo de su perfil altimétrico; una “zona de acumulación”(donde se produce ganancia neta de masa al cabo de un año hidrológico) y una

“zona de ablación”(caracterizada por la pérdida de masa al final de ese período) como se ve en la Figura 3.7. La primera de ellas se desarrolla desde las cumbres nacientes hasta la “Línea de Equilibrio Altitudinal”, conocida simplemente como “ELA”, la cual representa el limite del glaciar con balance de masa “cero”debido a que los procesos de acumulación y ablación se igualan. La zona de ablación se desarrolla a partir de esta isolínea hasta el frente o terminus (Rivera et al., 2016).

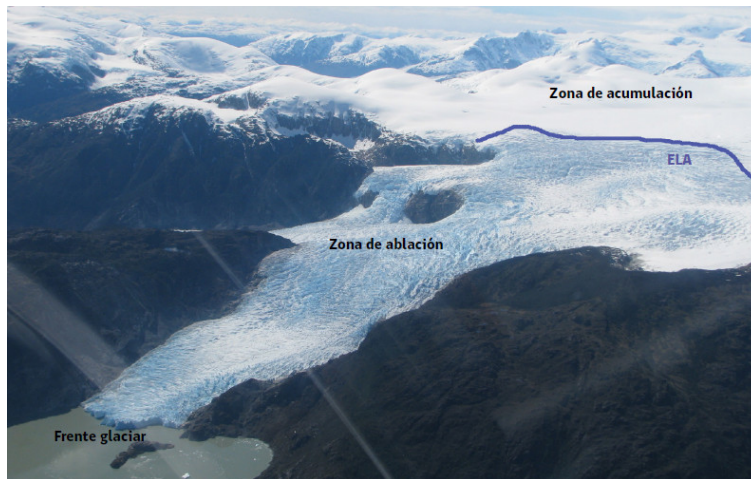


Figura 3.7: Esquema de zonificación glacial. Línea de Equilibrio (ELA). Fuente: Rivera et al. (2016).

# Capítulo 4

## Contexto Climático Continental y Local.

### 4.1. Climatología.

Desde el punto de vista climatológico, la zona intertropical se puede dividir en dos zonas con características diferentes. [Troll et al. \(1941\)](#) distinguió el clima tropical interno con precipitaciones más o menos continuas durante todo el año y el clima tropical externo cuando prevalecen las condiciones sub-tropicales, se caracteriza por una estación seca de mayo a septiembre y cuando las condiciones tropicales prevalecen por una estación húmeda de octubre a marzo.

El clima tropical se caracteriza por condiciones de temperatura homogéneas durante todo el año con una ligera estacionalidad de la temperatura del aire en los trópicos exteriores (temperaturas de 1°C a 2°C más altas durante el verano húmedo austral de octubre a marzo, que durante el invierno seco austral de mayo a Septiembre). En latitudes bajas, la radiación solar incidente también es más o menos constante durante todo el año, ya que la estacionalidad de la irradiación extraterrestre en los trópicos exteriores se ve atenuada por la pronunciada estacionalidad de las nubes (máxima cobertura de nubes durante el verano austral). En los trópicos interiores húmedos, las condiciones de humedad estable hacen que la acumulación y la ablación ocurran simultáneamente durante todo el año, mientras que los trópicos exteriores se caracterizan por una estacionalidad pronunciada de humedad específica, cubierta de nubes y precipitación. Por lo tanto, la acumulación notable ocurre sólo durante la estación húmeda y la ablación, que es fuerte durante los meses húmedos, se reduce durante el resto del año ([Kaser, 2001](#)).

La precipitación se debe principalmente a un flujo de humedad hacia el este desde la cuenca del Amazonas ([Garreaud et al. \(2003\)](#)). En escalas de tiempo interanuales, la gran variabilidad de las precipitaciones de verano se ha descrito en muchos estudios y existe un acuerdo general de que una fracción significativa de esta variabilidad está relacionada con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO<sup>1</sup>) ([Francou and Pizarro \(1985\)](#); [Aceituno \(1988\)](#); [Vuille and Bradley \(2000\)](#); [Garreaud and Aceituno \(2001\)](#)). Estos estudios concluyeron que los años de El Niño (fase

---

<sup>1</sup>El Niño Southern Oscillation (ENSO por sus siglas): El Niño es la expresión de una inestabilidad entre el océano y la atmósfera en el Pacífico ecuatorial. Es la fase cálida de un modo oscilatorio natural cuya contraparte, la fase fría, es la Niña. Ambas fases forman el ENSO, que es una oscilación del campo de presión atmosférica entre el este y el oeste del Pacífico ecuatorial acompañada de una transferencia masiva de aguas y energía a nivel del ecuador. Tanto El Niño como La Niña tienen una recurrencia de alrededor de 3 a 7 años. Existe un modo de baja frecuencia que hace que se sucedan fases en las cuales los Niño son más intensos y más frecuentes y fases en que las Niña dominan a su vez. Estas oscilaciones tienen una frecuencia pluridecenal y son asociadas a la Pacific Decadal Oscillation (PDO).

cálida de ENSO) tienden a ser cálidos y secos, mientras que los años de La Niña (fase fría de ENSO) están asociados con condiciones de frío y humedad en el Altiplano. Sin embargo, las características climáticas de La Niña / El Niño no son uniformes en la región intertropical de los Andes. Incluso a la escala de un país, las consecuencias de un evento de El Niño pueden variar considerablemente, por ejemplo, entre la costa norte de Perú y la región del Altiplano peruano meridional (Rabatel et al., 2012).

#### 4.1.1. Glaciares y Clima

Los procesos de ablación, son relacionados con los flujos de energía que se intercambian durante todo el año entre la atmósfera y la superficie del glaciar. Este análisis del balance de energía permite evidenciar los flujos más importantes responsables de la fusión y de la sublimación del hielo. Sin embargo, si se quiere explicar el retroceso de los glaciares, su aceleración durante las últimas décadas y relacionarlo al clima, es necesario correlacionar la evolución de los balances de masa con las variables registradas a largo plazo por las estaciones climáticas de la región, es decir con temperaturas, humedad relativa y precipitaciones, principalmente.

El clima evoluciona a escala regional en función de “forzamientos” conocidos, como el modo oscilatorio propio del Pacífico ecuatorial denominado ENSO. Por lo tanto, es necesario entender cómo este modo se relaciona con la variabilidad interanual de los balances glaciares andinos y en qué medida puede explicar, al menos en parte, el retroceso que ha afectado a los glaciares de la región en las últimas décadas (Francou et al., 2013).

## 4.2. ENSO

El fenómeno ENSO es una oscilación océano-atmósfera (variación de la presión atmosférica) a lo largo del Pacífico ecuatorial con consecuencias climáticas a nivel mundial. Dos fases han sido identificadas: El ENSO en su versión cálida (El Niño) y fría (La Niña) dan ritmo a la variabilidad de los balances glaciares en los Andes. Para “capturar” el impacto de esta variabilidad en varios glaciares, se decidió hacer mediciones mensuales del balance de masa en las zonas de ablación de los glaciares de Zongo desde 1991 y del Antisana desde 1995.

En los Andes, el periodo de El Niño está marcado en el aumento de la temperatura atmosférica que desplaza el límite lluvia/nieve hacia 5200 m s.n.m. incluso más alto, y que está, acompañada de una ligera disminución de las precipitaciones y de la nubosidad. En este contexto, el glaciar se derrite de manera acelerada (Favier et al., 2004). Sin embargo, en periodo La Niña, el glaciar se queda cubierto de nieve debido a bajas temperaturas y precipitaciones frecuentes.

Se sabe que el Pacífico es una de las causas de las variaciones climáticas que se registran en los Andes tropicales. Para demostrar la importancia del Pacífico en estos glaciares, nos referimos a la Figura 4.1 la circulación atmosférica en la región Ecuatorial del Pacífico, vista en un plano a lo largo del Ecuador, está compuesta por los vientos superficiales y los vientos de altura. Los vientos superficiales conocidos con el nombre de Alisios fluyen de Este a Oeste y transportan aire caliente y húmedo que convergen al Norte de Australia y sureste de Asia cargados de humedad en una zona donde la superficie del mar está relativamente caliente, (temperaturas por encima de 28°C, a veces de hasta 31.5°C), además en esta situación la diferencia en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) es de alrededor de 8°C entre ambas zonas del Océano Pacífico.



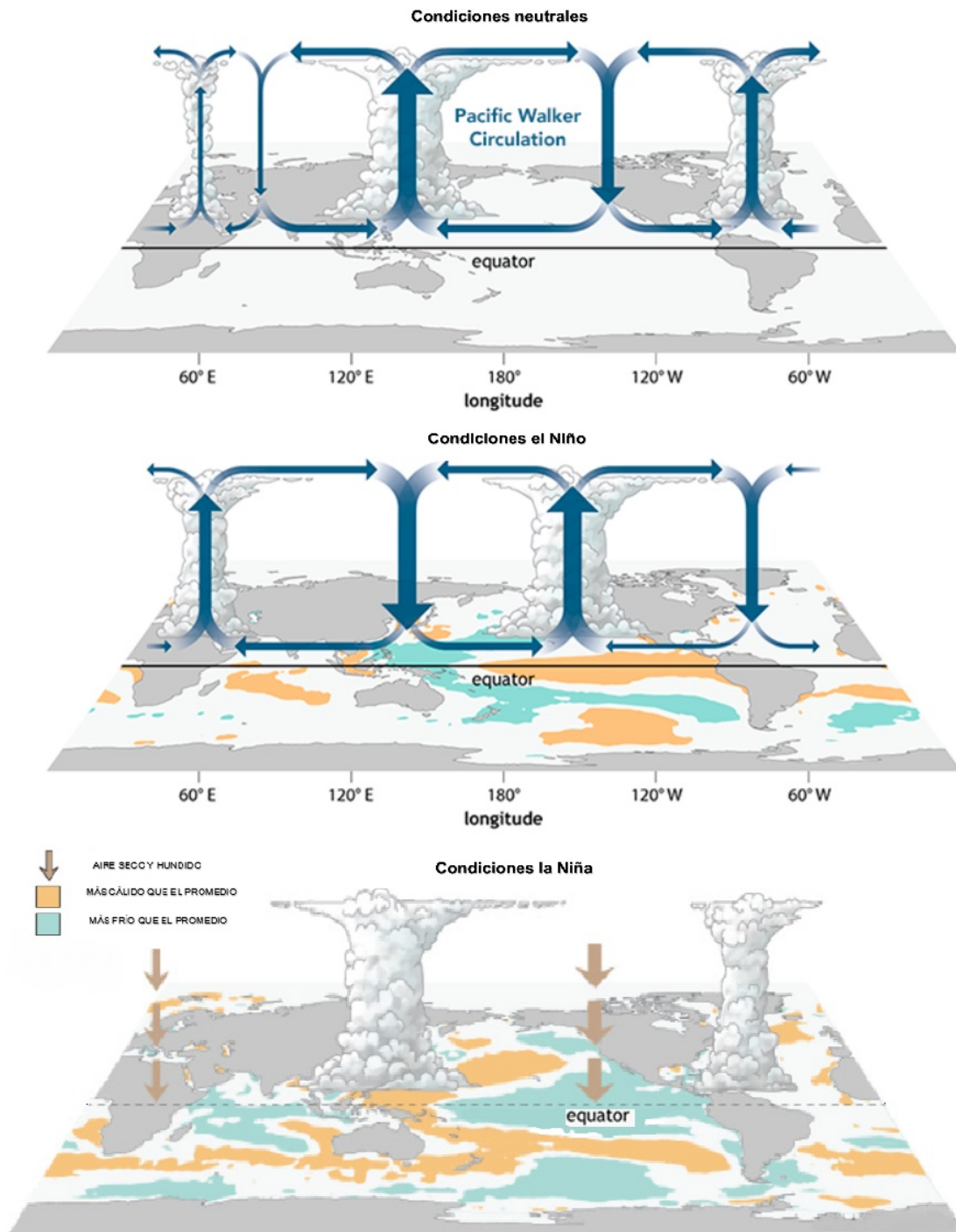


Figura 4.1: Fenómeno ENSO. El Pacífico ecuatorial: en condiciones neutrales “Normal”, en situación “El niño” y en situación “la Niña”. Las flechas representan los desplazamientos de masas de aire ascendentes y descendentes como los desplazamientos de aguas superficiales y profundas del océano Pacífico respectivamente. La circulación atmosférica sobre el ecuador “la circulación de Walker”, cambia sustancialmente con la llegada de El Niño y la Niña. Fuente: Ilustración por NOAA/Climate.gov

Cuando esta masa de aire asciende, se forman las nubes de tipo cumulonimbus, típico en las regiones tropicales, que da origen a precipitaciones abundantes en Indonesia y Australia. A alturas más elevadas (troposfera superior donde se produce la subsidencia, zona seca), el aire ya seco, retorna hacia el Este donde desciende y luego cierra el circuito. A esta circulación se le conoce con el nombre de Circulación o Célula de Walker (Leonardini, 2010).

Por otra parte el agua fría asciende desde las profundidades del océano hasta la superficie, frente a las costas de Sudamérica, en un proceso conocido como surgencia que es el “afloramiento o upwelling” de las aguas profundas hacia la superficie. Esta corriente ascendente es causada por el transporte de EKMAN (debida al efecto Coriolis por el cual las aguas superficiales se desvían hacia la izquierda en el Hemisferio Sur) y por la acción de los vientos Alisios, que soplan desde el Continente hacia el centro del Océano y que alejan el agua superficial próxima al borde costero. El agua profunda más fría emerge a la superficie para sustituir el agua desplazada.

Estas aguas profundas generalmente emergen desde profundidades menores de 100-200 metros, produciéndose así un aporte de nutrientes a las aguas superficiales empobrecidas por el consumo biológico. Si bien el fenómeno puede ocurrir en cualquier parte del Océano, sus características más destacadas se presentan a lo largo de los bordes orientales de los Océanos (esto es en las costas occidentales de los Continentes) (Leonardini, 2010).

Con el tiempo, los fuertes vientos que soplan en dirección oeste sobre el océano Pacífico producen una acumulación de agua superficial calentada por el Sol en la parte occidental del Pacífico Ecuatorial, cerca de Filipinas, Indonesia y Australia. Los científicos denominan a esta acumulación de agua “depósito caliente o piscina caliente”. Como resultado, el nivel del océano es de unos 50 a 60 cm más alto en el Pacífico Occidental que en el Pacífico Oriental. La termoclina<sup>2</sup> se constituye en el límite de las aguas superficiales templadas homogéneas y las aguas profundas frías y más densas. En la zona de Indonesia y Australia se encuentra a unos 200 metros, mientras que en la zona de Sudamérica a unos 50 metros de profundidad respectivamente. Asimismo la presión atmosférica es mayor en la región de Sudamérica, y menor en la región de Filipinas, Indonesia y Australia. Durante estas temporadas, en las costas occidentales de Sudamérica, las aguas del Pacífico se encuentran enriquecidas por sales minerales que fomentan la producción de plancton, el alimento principal de la fauna marina, lo que incrementa la población de peces y la pesca en esa región (Leonardini, 2010).

Para la situación “El niño” los vientos Alisios declinan en razón de la disminución del gradiente de presión entre el Pacífico oriental y occidental. A causa de tal disminución de los vientos Alisios, un desequilibrio se produce y la piscina caliente se desplaza hacia la zona central y oriental del océano Pacífico. En consecuencia, la disminución del gradiente de presión entre Tahiti (Polinesia) y Darwin (norte de Australia) continúa, disminuyendo aún más los vientos Alisios e incrementando el ingreso de aguas cálidas hacia el continente sudamericano. El ciclo dura en promedio 18 meses (Leonardini, 2010).

En la situación de “la niña” se observa una magnificación de la situación “normal”, con la intensificación del upwelling ecuatorial, las aguas llegan a ser más frías, las precipitaciones al oeste se intensifican y a la inversa, la sequedad, se instala a lo largo de las costas sudamericanas. En conjunto, con los vientos Alisios fortalecidos, las precipitaciones provenientes del atlántico y de la cuenca amazónica se distribuyen al centro del continente americano según un mecanismo complejo

---

<sup>2</sup>Termoclina: Capa en que la temperatura desciende bruscamente con la profundidad en el cuerpo del agua, es permanente en los Océanos ocurre entre 200 y 1000 metros de profundidad.

(Leonardini, 2010).

En los Andes tropicales el Pacífico es una de las causas de las variaciones climáticas a escala decenal. Para demostrar la importancia del Pacífico en estos glaciares, nos referimos a la Figura 4.2 donde son presentados los balances mensuales medidos en las zonas de ablación de los glaciares Antisana y Zongo así como la temperatura de la superficie del mar en los sectores Niño3.4 y Niño1+2. El sector Niño3.4 es el más sensible a la anomalía cálida cuando se mueve al centro del Pacífico, mientras que el sector Niño1+2 sufre esta anomalía cuando la masa de agua cálida alcanza la costa americana (Francou et al., 2013).

En Ecuador y en Colombia, en periodo El Niño, la temperatura del océano alcanza su pico en el centro del Pacífico durante el verano austral (noviembre-febrero), el glaciar “responde” de manera óptima entre febrero y mayo, es decir, tres meses después. En los Andes, es el aumento marcado de la temperatura atmosférica que desplaza el límite lluvia/nieve hacia 5200 m s.m.m. incluso más alto, y que, acompañada de una ligera disminución de las precipitaciones y de la nubosidad, degrada el albedo a la superficie del glaciar. En este contexto, el glaciar se derrite de manera acelerada (Favier et al., 2004). Sin embargo, en periodo La Niña, el glaciar se queda cubierto de nieve debido a bajas temperaturas y precipitaciones frecuentes. En Colombia, en el glaciar la Conejeras, que culmina a 4960 m s.n.m. solamente, el contraste de las dos situaciones es aún más claro: se pasa de una situación El Niño donde el balance es muy negativo en toda la superficie del glaciar, a una situación La Niña donde el balance del glaciar es positivo (Francou et al., 2013).

La temperatura de la superficie del mar del Pacífico controla en gran medida el balance de los glaciares tropicales en Bolivia. En el periodo cálido del Pacífico (El Niño), la temperatura es de 0.7°C - 1.3°C más alta que en el periodo frío (La Niña). Además, tiende a haber un déficit de precipitaciones con una disminución del 10% al 30% en comparación con la situación inversa. En la sección §4.2.1, se ve que los años con un déficit de acumulación neta en el glaciar de Zongo son años El Niño, mientras que los años con acumulación neta por encima del promedio son años La Niña. El periodo de septiembre a diciembre se ve particularmente afectado con una disminución de la nubosidad, lo que lleva a una tasa de ablación muy alta. Se ha podido medir la pérdida de un metro de hielo en un mes a una altura de 5050 - 5150 m. A diferencia de Ecuador y de Colombia, la zona del Pacífico que está mejor correlacionada a los balances glaciares de Bolivia es el este del Pacífico, el sector Niño1+2, cerca de las costas sudamericanas. Sin embargo, hemos visto que durante el periodo reciente (2001 - 2005) la anomalía cálida del Pacífico, marcada en su parte central, no ha alcanzado las costas sudamericanas, una configuración que tiende a identificarse con la denominación de “El Niño-Modoki”. Es una de las razones por las cuales los glaciares del “trópico externo” responden de manera menos sistemática a las anomalías del Pacífico. Otra razón podría ser que la “ventana de respuesta” de los glaciares bolivianos, como lo hemos visto, se encuentra al comienzo de la temporada de las precipitaciones (septiembre-diciembre), mientras que el pico de la anomalía ocurre generalmente en el Pacífico durante el primer semestre del año. Además, es necesario mencionar que la anomalía cálida o fría del Pacífico tiene que ser larga, intensa y desplazarse hasta el lado sudamericano para que los glaciares bolivianos respondan de manera previsible (Francou et al., 2013).

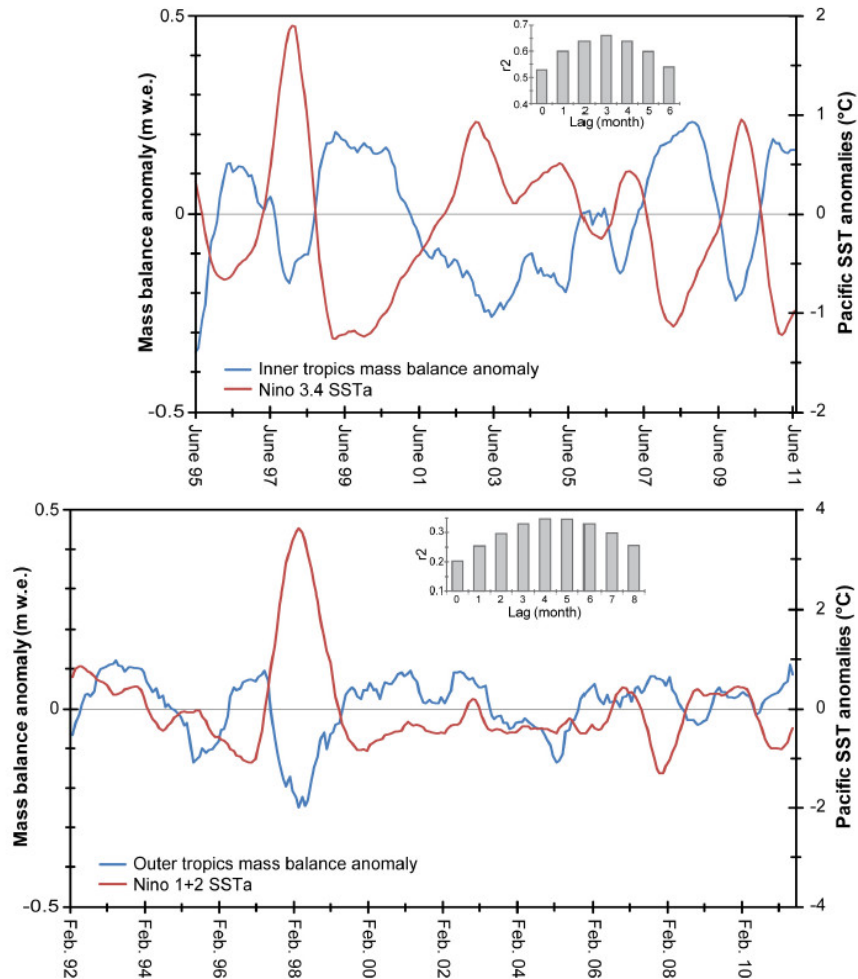


Figura 4.2: La figura superior muestra el balance de masa mensual a menos de 5000 m del glaciar del Antisana, Ecuador, y el balance del glaciar La Conejeras, Colombia (curva azul). En rojo aparece la anomalía de temperatura superficial del océano en el sector Niño3.4 (centro del Pacífico). Las series van de junio de 1995 a agosto de 2011. Las variables han sido suavizadas con un promedio móvil de doce meses. Los valores del balance de masa están desfasados por tres meses con la temperatura del océano. Las barras muestran la mejor correlación con el desfase de las dos variables. En la parte baja, la misma representación, para el balance de masa del Zongo (zona de ablación), Chacaltaya y Charquini Sur en Bolivia, y la temperatura superficial del océano en el sector Niño1-2 (sector de la costa suramericana). Balance mensual con atraso de cuatro meses, conforme a la correlación óptima indicada por las barras arriba. Fuente: [Francou et al. \(2013\)](#)

En Perú ( $8^{\circ}\text{S}$ ), la situación es intermedia. Por lo general, los glaciares responden de manera similar a los de Bolivia, pero también podemos observar comportamientos análogos a los de Ecuador. Las actuales investigaciones están lejos de haber agotado el tema. Otros “forzamientos” regionales pueden ocurrir en los glaciares de la región, sobre todo viniendo del Atlántico y de la Amazonía, los cuales aportan, junto con el “monzón amazónico”, lo esencial de la cantidad de las precipitaciones en los glaciares de la región ([Francou et al., 2013](#)).

En conclusión, es indiscutible que los eventos cálidos del Pacífico, que tuvieron lugar entre 1976 y hasta mediados de 2000, generalmente intensos y muy largos, han contribuido a acelerar el repliegue de los glaciares de la región. Como se ve en la figura 4.3, al ENSO, que se reproduce con una frecuencia de 3-7 años, se superpone otro modo oscilatorio de frecuencia del orden de 20-25 años, que se denomina la Pacific Decadal Oscillation (PDO\*). Este modo complejo de baja frecuencia asocia forzamientos de diversos orígenes, algunos tropicales (ENSO), y otros extra-tropicales en el Pacífico norte. Así, el último periodo positivo de la PDO, de 1976 a 2007, se caracterizó por eventos cálidos (El Niño) frecuentes e intensos en el Pacífico ecuatorial, mientras que el periodo anterior de PDO negativo generó eventos fríos (La Niña) más frecuentes e intensos. Se observó que el periodo 1976 - 2007 estuvo acompañado por un repliegue acelerado de los glaciares en los Andes, mientras que durante el periodo anterior, 1948 - 1975, disminuyeron poco. Un estudio reciente por Seiler et al. (2013) confirma la fuerte dependencia del clima en Bolivia (sierra y llanos) a ambas fases de la PDO. Como se produjo, al parecer, una evolución hacia una PDO negativa en 2007, se podría esperar fases frías del ENSO (La Niña) más marcadas y más intensas en el futuro. Pero, es poco probable que este cambio de fase del Pacífico pueda atenuar significativamente el retroceso de los glaciares andinos, mientras que sigue marcada la tendencia al recalentamiento de la región andina.

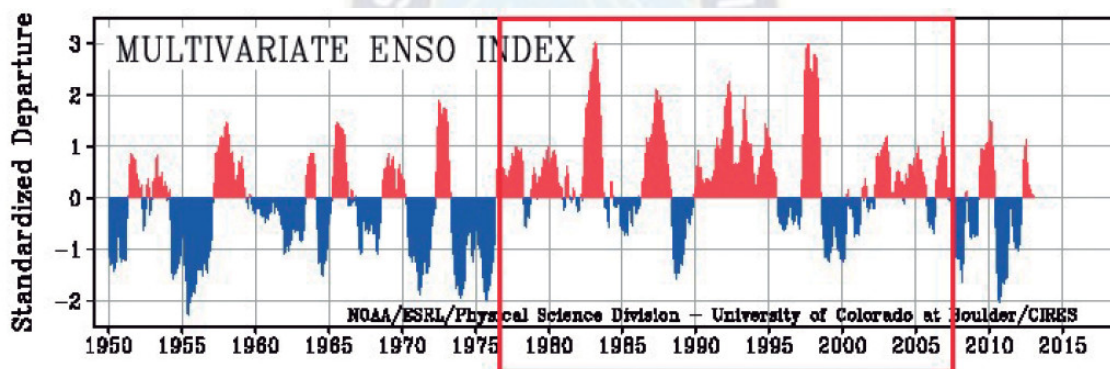


Figura 4.3: El índice multivariado del ENSO (MEI) indica las distintas fases (cálidas/frías) del Pacífico desde 1950. En rojo los eventos cálidos, los más marcados son fenómenos El Niño. El MEI es una combinación de seis variables del centro del Pacífico ecuatorial: presión a nivel del mar, velocidad y dirección del viento zonal y meridiano, temperatura superficial del mar, temperatura de superficie y nubosidad (Wolter y Timlin, 1993). En el recuadro rojo, el periodo con más frecuencia/intensidad de la fase cálida del ENSO, que corresponde a un modo positivo de la Pacific Decadal Oscillation (PDO). Fuente: Francou et al. (2013)

En efecto, más allá de estas oscilaciones de alta/baja frecuencia del Pacífico, que marcan una gran parte de la variabilidad del balance de masa de los glaciares andinos, es importante ver cuál es la tendencia climática general que surge en la región andina desde los años 1950. Para ello, debemos recurrir a los registros clásicos efectuados en las estaciones meteorológicas y a los datos reanalizados (Francou et al., 2013).

#### 4.2.1. Acumulación neta en función del tiempo en la altura (~ 6000 m): El caso del glaciar de Zongo (Bolivia)

De acuerdo a las leyes de la física, con el descenso de la temperatura atmosférica disminuye la cantidad de vapor de agua máxima contenida en un volumen de aire. A 10°C, 5°C, 0°C, -10°C y -20°C, la presión de vapor de saturación (en hPa) pasa de 12.3 a 8.72, 6.10, 2.6 y 1.03 respectivamente. Por esta razón las precipitaciones tienden a disminuir a mayor altitud, especialmente en los Trópicos. En la zona tropical, a medida que la masa de aire asciende la ladera de una montaña expuesta a flujos húmedos, como el de la cuenca amazónica en el caso del valle de Zongo, las precipitaciones llegan a un máximo entre 1500 m s.n.m. y 3000 m s.n.m., luego disminuyen más arriba para alcanzar una base aproximada de 1000 mm/año a la altura de los glaciares a 4800 m s.n.m. El efecto mecánico del viento y la sublimación<sup>3</sup> acentúan aún más la disminución de la acumulación neta a gran altura, pero también aumenta la variabilidad en función de la topografía: las depresiones y bajos de vertientes aprovechan de fenómenos de sobrecarga (“sobrecumulación” de nieve) por la combinación de efectos de los vientos fuertes de invierno (“snow-drift”) y de las avalanchas, mientras que los montículos descubiertos son más susceptibles a la erosión mecánica y a la sublimación. En los perímetros planos de los sitios de extracción de muestras del Illimani (6340 m s.n.m.) y del Sajama (6540 m s.n.m.), los valores de acumulación anual encontrados en el siglo pasado son en promedio de 580 mm eq. agua/año y de 440 mm eq. agua/año respectivamente (Francou et al., 2013).

La Figura 4.4 muestra que las precipitaciones recogidas en un pluviómetro totalizador (P2) situado en la morrena de la derecha del glaciar a 5100 m s.n.m., son en promedio de 1000 ± 130 mm/año, pudiendo variar en los extremos entre 800 mm y 1300 mm. Aunque fue diseñado para recoger de manera óptima las precipitaciones sólidas, este tipo de pluviómetro tiende no obstante a subestimarlas.

En altura (5800 m s.n.m.), la acumulación neta (AC) es en promedio de 940 mm/año, con una variabilidad interanual más alta (de 1 a 2.3). La correlación es bastante buena entre el pluviómetro totalizador (P2) y la acumulación neta medida a 5800 m s.n.m. (AC-5800) excepto en 2 años de 14. Las causas de estas diferencias son difíciles de explicar; pueden derivar de diferencias en las precipitaciones que caen en el suelo entre estas dos altitudes, de errores en la estimación de la capa anual acumulada en altitud, de la evolución de la capa en el suelo objeto de erosión mecánica y de sublimación, también el sitio de medición puede recibir diferentes contribuciones por el viento y las avalanchas (Francou et al., 2013).

La extensión de la zona de acumulación en el glaciar (AAR) está muy relacionada con las precipitaciones que recibe el glaciar, pero puede desviarse de esta variable notoriamente, como en 2004-2005 o en 2008-2009. Esto no es sorprendente ya que la AAR, así como el balance neto específico vinculado a está, depende a nivel del glaciar no solamente de la acumulación neta sino también de la ablación. Los años con altos valores de precipitación son años con anomalía fría en el Pacífico (La Niña), mientras que los años con bajos valores son años con anomalía cálida (El Niño) (Francou et al., 2013).

<sup>3</sup>Sublimación: Pérdida de hielo en la fase vapor. Este proceso requiere una gran cantidad de energía equivalente a 2.834.000 joules por kg, es decir, alrededor de 8.5 veces más que la fusión. La sublimación es elevada en ambientes donde la atmósfera es seca y ventosa. Entra en la formación de los penitentes de nieve y de hielo.

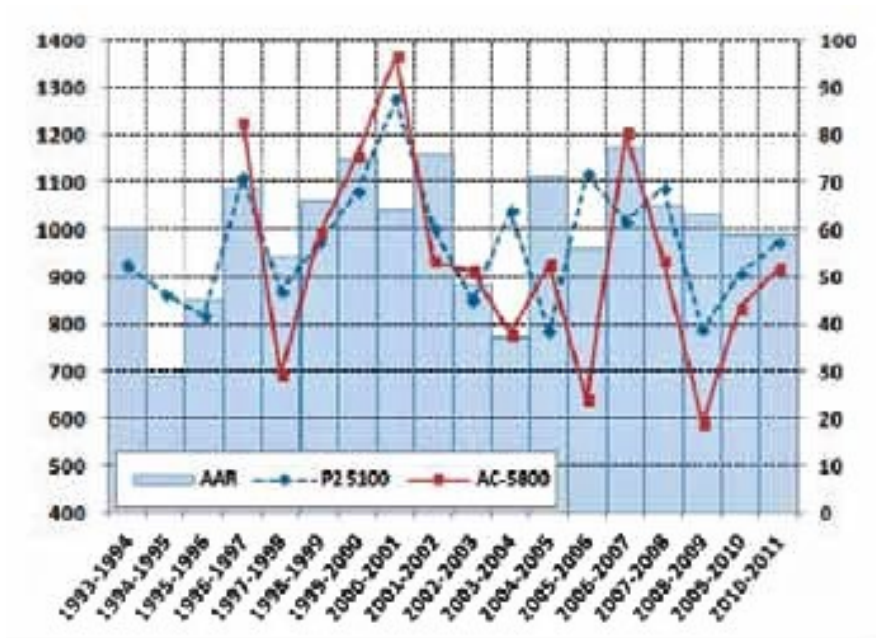


Figura 4.4: Evolución de la acumulación neta medida a 5800 m sobre el glaciar de Zongo en septiembre de cada año (AC-5800: trazo lleno rojo, en mm de equivalente agua). Paralelamente, se ha agregado la precipitación acumulada medida cada mes en un pluviómetro en la zona de ablación del glaciar a 5100 m s.n.m. (P2 5100: trazo punteado azul, en mm de agua). En barras, el ratio entre la superficie de la zona de acumulación y la superficie total del glaciar (AAR, en %). Fuente: [Francou et al. \(2013\)](#)

A continuación se describen brevemente algunos índices desarrollados para describir el fenómeno ENSO.

### Índice de oscilación Sur (SOI)

El Índice de Oscilación del Sur (SOI) se calcula a partir de la diferencia de presión entre Tahití y Darwin Figura 4.5 que se presenta debido al efecto de subibaja que se presenta en el Pacífico Ecuatorial. Con frecuencia la magnitud de esta oscilación está relacionada con el desarrollo e intensidad de los eventos de El Niño y La Niña. Los valores anormalmente bajos (negativos) de este índice corresponden a las condiciones de El Niño, mientras que las condiciones opuestas con un valor de SOI anormalmente alto (positivos) se llaman episodios de La Niña. Los eventos de El Niño ocurren con una separación de 3 a 7 años, generalmente se establecen alrededor de abril o mayo y persisten durante aproximadamente un año a partir de entonces Figura 4.6 (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>).

Algunos investigadores han sugerido que la frecuencia (y tal vez la intensidad) de El Niño se verá afectada por el cambio climático resultante de la continuación de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. Sin embargo, todavía no hay consenso científico sobre este tema, o sobre si la frecuencia relativamente más alta de El Niño en las últimas dos décadas está relacionada con el lento aumento de las temperaturas globales en este siglo. Esto se discute más a fondo en la

página sobre modelos climáticos globales (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>).

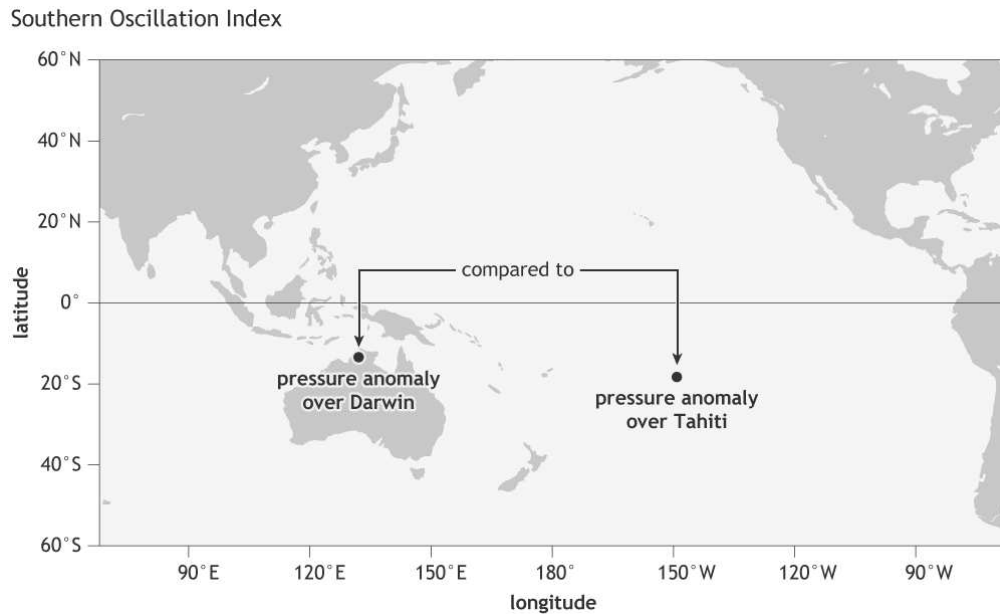


Figura 4.5: Ubicación de las dos estaciones cuyas presiones del nivel del mar contribuyen al Índice de Oscilación del Sur (SOI): una sobre Tahití, en la Polinesia Francesa, y otra sobre Darwin, Australia. Fuente: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one>

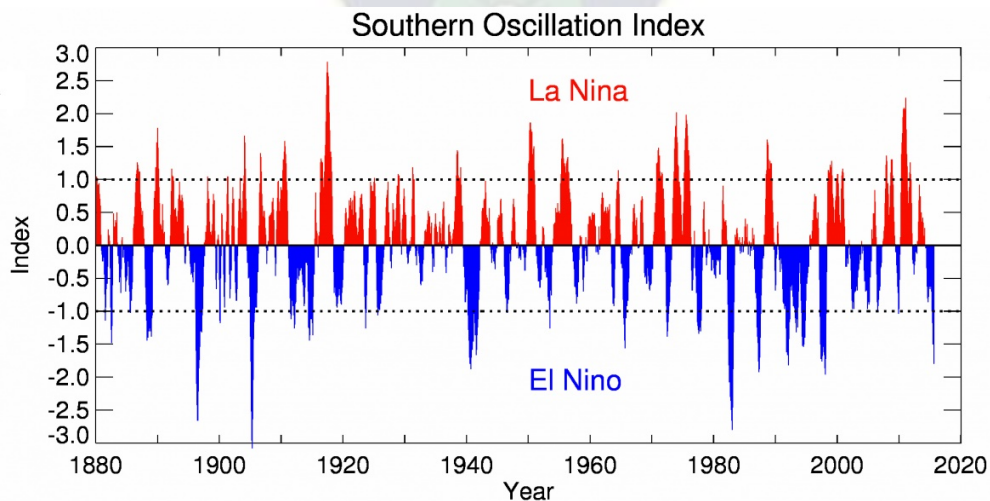


Figura 4.6: Una gráfica del Índice de Oscilación del Sur (SOI) derivado de las mediciones de presión en Tahití y Darwin de 1880 a 2020. Cada barra es un valor mensual del SOI. Fuente: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>



## Índice ENSO multivariante (MEI).

El índice ENSO multivariante (MEI) se basa en las seis principales variables observadas en el Pacífico tropical. Estas seis variables son: presión a nivel del mar, componentes zonales y meridionales del viento en la superficie, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire en la superficie y fracción de nubosidad total del cielo. La siguiente figura muestra el MEI desde 1980. Los valores negativos de la MEI representan fase fría del ENSO (Niña), mientras que los valores positivos del MEI representan la fase cálida del ENSO (El Niño) (Figura 4.7) (Leonardini, 2010).

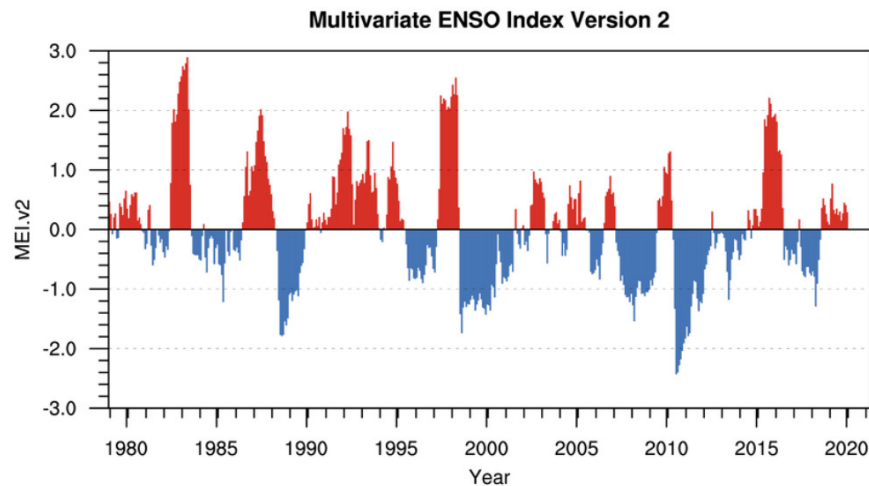


Figura 4.7: Índice ENSO multivariante relacionado con condiciones cálidas (positivas) y frías (negativas). Fuente: Centro de Diagnóstico Climático NOAA-CIRES, Universidad de Colorado en Boulder.

## Índices de temperatura de la superficie del mar (SST)

Los índices Niño 1+2, 3 y 4 son obtenidos a partir de la temperatura de la superficie del mar (Sea Surface Temperature SST) Figura 4.8. El Niño (La Niña) es un fenómeno en el Océano Pacífico ecuatorial caracterizado por cinco anomalías consecutivas de temperatura de la superficie del mar de 3,4 meses de duración en la región niño 3,4 que está por encima (por debajo) del umbral de  $+0.5^{\circ}\text{C}$  ( $-0.5^{\circ}\text{C}$ ). Este estándar de medida se conoce como índice de niño oceánico (ONI).

Históricamente, los científicos han clasificado la intensidad de El Niño basándose en anomalías del SST que exceden un umbral preseleccionado en una determinada región del Pacífico ecuatorial. La región más utilizada es la región niño 3.4, y el umbral más utilizado es una desviación positiva SST de lo normal mayor o igual que  $+0.5^{\circ}\text{C}$ . Dado que esta región abarca la mitad occidental de la región ecuatorial, proporciona una buena medida de cambios importantes en los gradientes SST y SST que resultan en cambios en el patrón de convección tropical profunda y circulación atmosférica. El criterio, que a menudo se utiliza para clasificar los episodios de El Niño, es que cinco anomalías consecutivas de 3 meses consecutivos en ejecución significan que las anomalías del SST superan el umbral. (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/>)

Los estudios han demostrado que una condición necesaria para el desarrollo y persistencia de la convección profunda (mayor nubosidad y precipitación) en los trópicos es que el SST local sea de

28°C o superior. Una vez alterado el patrón de convección profunda debido a los SST anómalos, la circulación atmosférica tropical y subtropical se ajusta al nuevo patrón de calentamiento tropical, dando lugar a patrones anómalos de precipitación y temperatura que se extienden mucho más allá de la región del Pacífico ecuatorial. Una anomalía SST de +0.5°C en la región niño 3,4 es suficiente para alcanzar este umbral desde finales de marzo hasta mediados de junio. Durante el resto del año se requiere una anomalía SST más grande, de hasta +1.5°C en noviembre-diciembre-enero, para alcanzar el umbral para soportar la convección profunda persistente en esa región (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/>).

La comunidad científica Internacional, para el monitoreo y estudio del Fenómeno de El Niño, y además por la gran extensión del Océano Pacífico, establecen y clasifican la existencia de regiones (áreas) en el Océano Pacífico Ecuatorial, que son las siguientes:

- La región 1 y la 2, que afectan a Sudamérica.
- La región 3, que impacta en México y los Estados Unidos.
- La región 4, que afecta a varios Países del Continente Asiático.

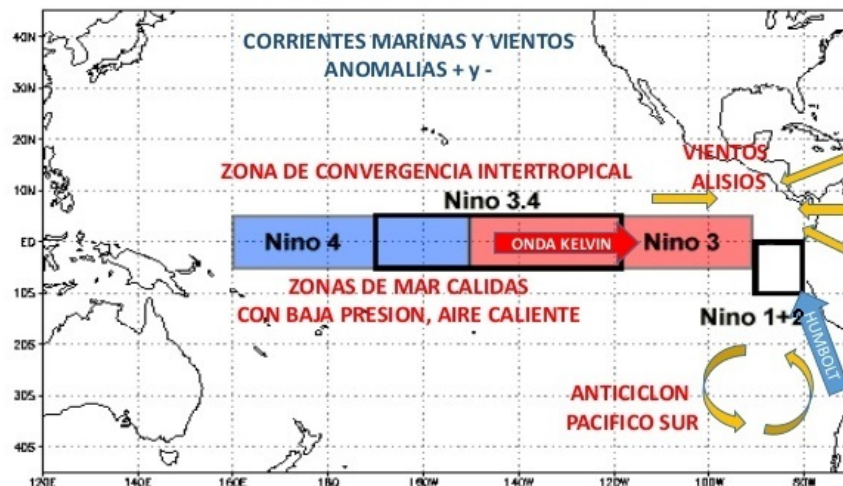


Figura 4.8: Regiones en las que se divide el Océano Pacífico Ecuatorial para estudiar el Fenómeno ENSO. Fuente: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/>

# Capítulo 5

## Generación de base de datos.

En este estudio, se utilizan datos de entrada como:

- Los datos meteorológicos e hidrológicos que se registraron en estaciones automáticas administradas por el IRD<sup>1</sup> y el IGEMA<sup>2</sup> a intervalos de tiempo inferiores a una hora, a excepción de las observaciones manuales de precipitación en algunos medidores.
- Los datos glaciológicos consistieron en mediciones mensuales y anuales de una red de estacas y pozos en las zonas de ablación y acumulación del glaciar Zongo.
- Modelo Digital de elevación (DEM) aster de 30 m de resolución de la zona de estudio para simular la distribución de la radiación solar directa a través de la superficie del glaciar.

Los modelos se aplican para atribuir el cambio en la irradiancia debido a componentes topográficos específicos, como la pendiente y el aspecto, el relieve sombreado, las sombras proyectadas y la combinación de las mencionadas. La “pendiente y aspecto” se refiere a un componente topográfico físico descriptivo del relieve, orientación respecto a la exposición de la masa glaciar, responsable de cambiar los valores de irradiación en función de la orientación y la pendiente de la superficie en las áreas sin sombra del glaciar. En este estudio, comparamos específicamente el impacto del relieve sombreado y las sombras proyectadas con la influencia colectiva de la pendiente y el aspecto. Nos centramos en estas comparaciones en parte porque generalmente se supone que la pendiente y el aspecto son los factores topográficos dominantes que afectan la radiación solar en el terreno montañoso (Dozier, 1980). Los datos de entrada clave para estimar el balance de masa mensual en el glaciar Zongo del presente proyecto son un shapefile del glaciar (.shp), el modelo de elevación digital (DEM) que debe ser más grande que el shapefile y los datos climatológicos, glaciológicos.

En las siguientes secciones se describe el procesamiento de datos climatológicos, glaciológicos y espaciales que se realizaron para generar la base de datos utilizada en este estudio.

---

<sup>1</sup>El IRD está presente en Bolivia desde 1968. Es la única institución científica pública francesa presente en el país. En Bolivia, el IRD lleva a cabo programas de investigación y de formación en asociación estrecha con sus colaboradores: universidades, institutos públicos, empresas, instituciones de red francesa y organismos internacionales.

<sup>2</sup>El Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente es una Unidad Académica encargada de planificar, ejecutar, evaluar proyectos de investigación en las ciencias geológicas, tanto básica como aplicada, en los que participan investigadores – docentes y estudiantes, considerando las problemáticas geológicas de la región y el país.

## 5.1. Estaciones de monitoreo en Zongo.

En el glaciar Zongo se tienen dos estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en la morrena (“Zongo-m”, rectángulo azul, Figura 5.1) y en la superficie del glaciar (“Zongo-g”, círculo azul, Figura 5.1) a 5050 m s.n.m. Que registran a intervalos de 30 minutos las temperaturas del aire ventiladas y sin ventilación, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, radiación de onda corta descendente y reflejada, y radiación de onda larga entrante y emitida. También se muestran las posiciones de un sensor de presión de agua instalado en la estación hidrométrica a 4830 m s.n.m. Que mide la descarga de la corriente proglacial, pozos de nieve, estacas de ablación y la estación meteorológica fuera del glaciar a 4750 m s.n.m (“Plataforma”). Las precipitaciones, la temperatura, la humedad y la radiación de onda corta más allá de la influencia térmica del glaciar son registradas por una estación meteorológica a 4750 m s.n.m., aproximadamente a 1 km del frente del glaciar (Sicart et al., 2011), donde un observador registra diariamente la precipitación diaria.

El IRD mantiene todas estas estaciones en funcionamiento. Una estación meteorológica adicional en el glaciar Chacaltaya (“Chacaltaya”, 16°21’S, 68°7’O, 5200 m s.n.m.), 8 km al Sur del glaciar Zongo, se consideró representativa de las condiciones climáticas de la zona de estudio y por lo tanto, se incluyó en el análisis de datos (ver Fuchs, 2013). En la Figura 5.2 se ilustran algunos de los instrumentos instalados en la morrena<sup>3</sup>.

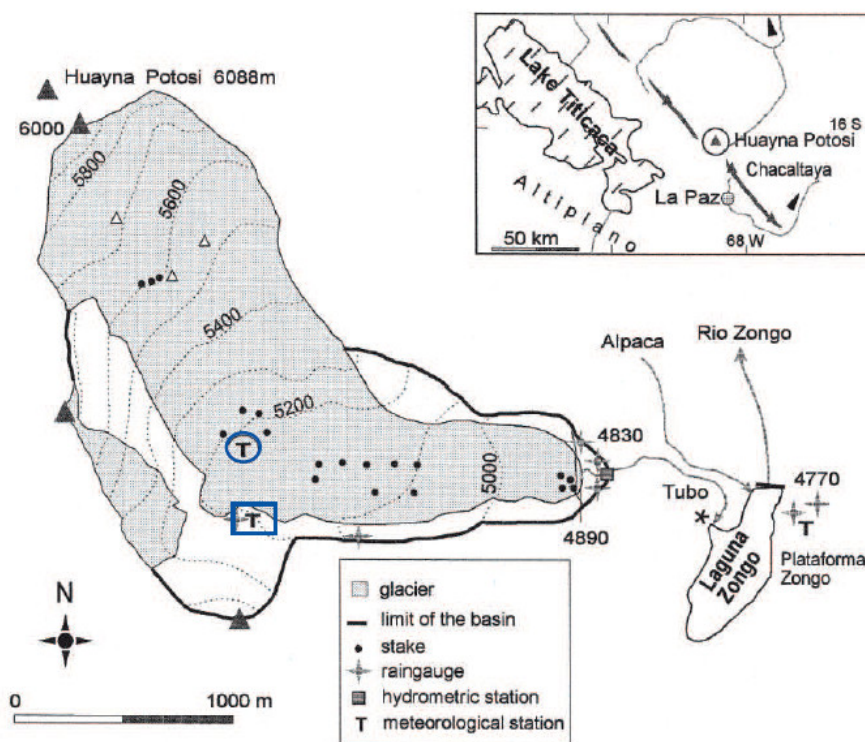


Figura 5.1: Ubicación del equipo de monitoreo en el glaciar Zongo. Fuente: Wagnon et al. (1999a)

<sup>3</sup>Montón de piedras, arena, barro y otros materiales que erosiona, transporta y acumula un glaciar. “Las morrenas pueden ser de fondo, laterales, terminales, etc., según su situación respecto a la lengua del glaciar” (Francou et al., 2013)

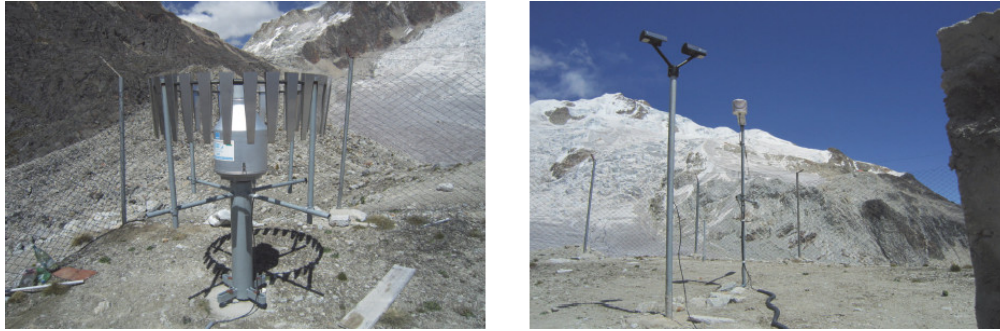


Figura 5.2: Indicador de precipitación sólida (izquierda) y sensores de disdrómetro, temperatura y humedad (derecha) en Zongo-m. Fuente: Yoshihiro Asaoka

### 5.1.1. Estación meteorológica Mévis a 4750 metros (Plataforma).

Tiene una estación meteorológica THIES-CLIMA modelo: DL15 V2.00, que porta los captosres siguientes (Figura 5.3):

- Sonda de temperatura situada a 190 cm del suelo (marca: Thies, referencia: Hygro-Thermogeber),
- Sonda de humedad relativa situada a 190 cm del suelo (marca: Thies, referencia: Hygro-Thennogeber),
- Piranómetro cortas longitudes de onda situado a 155 cm del suelo, orientado hacia el cielo (marca: Kipp & Zonen, referencia: Pyranometer CM3, 7.1415.03.000),
- Anemómetro situado a 230 cm del suelo (referencia: Windgeber 4.3303.10.007),
- Sonda de temperatura, Pt 100 situada a un metro de profundidad dentro del suelo (marca: desconocida, referencia: Temperaturegeber, 2.1235.00.000).
- Pluviómetro a báscula que esta fuera de servicio.

La alimentación de energía eléctrica es a través de una batería de 12 V que es cambiada lo más frecuentemente posible (Francou et al., 2004a).

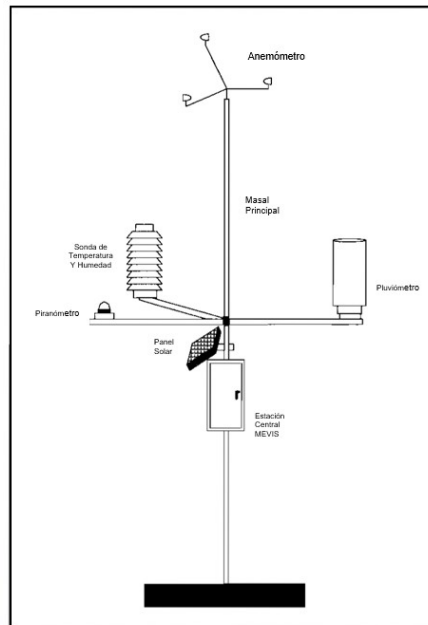


Figura 5.3: Estación meteorológica Mevis a 4750 m de altitud (Rabatel et al., 2004).

### 5.1.2. Estación meteorológica ORE a 5050 m.s.n.m

La estación ORE (Campbell Ore23x) está instalada desde el 25/08/2003 sobre la morrena lateral derecha del Glaciar Zongo. Las mediciones han sido definidas en el marco del proyecto "GLACIOCLIM" ("GLACIers, un Observatoire du CLIMat"), que corresponde a un "Observatoire de Recherche sur l'Environnement (ORE)". El monitoreo de esta estación está previsto para un mínimo de 10 años (figura 5.4 y 5.5) (Francou et al., 2004a).

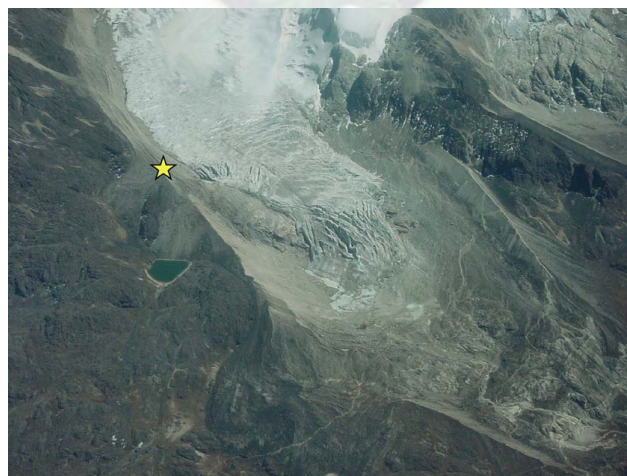


Figura 5.4: Ubicación de la estación Zongo (Foto B. Pouyaud, del 04/08/2000). Fuente: Francou et al. (2004a)



Figura 5.5: Estación de Campo Roca: Sistema de adquisición de datos, CR800 de Campbell Scientific; Temperatura y Humedad Relativa del aire, CS215 de Campbell Scientific; velocidad y dirección del viento, Windsonic de Gill; pluviómetro, T200B de Geonor. Fuente: Romain Biron

### Descripción de los instrumentos.

En la tabla 5.1 se proporciona el listado de los parámetros medidos y de los equipos monitoreados, con los códigos correspondientes en la figura 5.7.

Tabla 5.1: Listado de los parámetros e instrumentos monitoreados.

Parámetro (unidad)	Marca, tipo de sensor [Char = Charquini solo] [Ore = ORE solo]	Código en las figuras	Altura de los sensores/ suelos	Precisión constructor (o acumulada maxi)
Adquisición de los datos	Campbell, central Cr23x y central Cr10 [Char]	1 2		
Precipitaciones (mm)				
Medición por pesada	Geonor, T-200B	3	1.75 m	0.1 mm maxi : 550mm
Medición por báscula	Hobo, Event Logger [Char] Elsyde, R01 3030A [Ore]	4 5	1.60 m 1.20 m	0.25 mm 0.2 mm 5 à 10 mm
Totalizadores	Fabricación local [Ore]	6	1.40 m	maxi : 1150mm
Altura de nieve, medición por ultrasonidos (mm)	Campbell, UDG01, idéntico a la SR50 actual	7	1.15 m	± 1 cm o 0.4% distancia
Flujo suelo/atmósfera ( $W m^{-2}$ )	Hukseflux, HPF01	8	- 3 cm	$60 \mu V / Wm^{-2}$
Temperatura del aire, no ventilado ( $^{\circ}C$ )	Termopares de fabricación local [Char]	9	1.50 m	± 0.2 $^{\circ}C$
Temperaturas en el suelo ( $^{\circ}C$ )	Termopares de fabricación local	10	-3 , -10 -20 -43 cm	± 0.2 $^{\circ}C$
Velocidad del viento ( $m s^{-1}$ )	Young, 05103	11	2.05 m	± 0.3 $m s^{-1}$
Dirección del viento (deg.)	Young, 05103		2.05 m	± 3 deg.
Humedad relativa (%)	Vaisala, HMP45C	12	1.00 m	± 1% à 20 $^{\circ}C$
Temperatura del aire ventilada ( $^{\circ}C$ )	Vaisala, HMP45C		1.00 m	± 0.2 $^{\circ}C$ à 20 $^{\circ}C$
Radiaciones solares de ondas cortas SW, incidentes et reflejadas ( $W m^{-2}$ )	Kipp & Zonen, CM3 $0.3 < \lambda < 2.8 \mu m$	13	0.90 m	± 10% sobre total diario
Radiaciones de ondas largas LW, emitidas por la atmósfera y el suelo ( $W m^{-2}$ )	Kipp & Zonen, CG3 $5 < \lambda < 50 \mu m$		0.90 m	± 10% sobre total diario

Fuente: [Francou et al. \(2004a\)](#)

### Pluviógrafo a pesada GEONOR.

La Figura 5.6 presenta un esquema del instrumento. Las precipitaciones líquidas y sólidas son captadas a través de un cilindro de aluminio de 200  $cm^2$  de sección y de color negro, que favorece la fusión de la nieve sobre las paredes. Ella cae en un recipiente de plástico de 12 litros, el máximo que se puede medir antes de vaciar es de  $\mp$  550 mm de precipitación teniendo en cuenta el alcohol adicional para evitar el congelamiento que podría provocar daños (1.7 litro para  $-7^\circ C$ ) y el aceite para bloquear la evaporación (0.4 litro). El recipiente se cuelga sobre una meseta con 3 cadenas metálicas, una de ellas incluye un sensor de pesada cuyo principio es el del hilo vibrador: medición de una frecuencia eléctrica proporcional al peso medido (Código 3 en las Figuras 5.7 y 5.8) (Francou et al., 2004a).

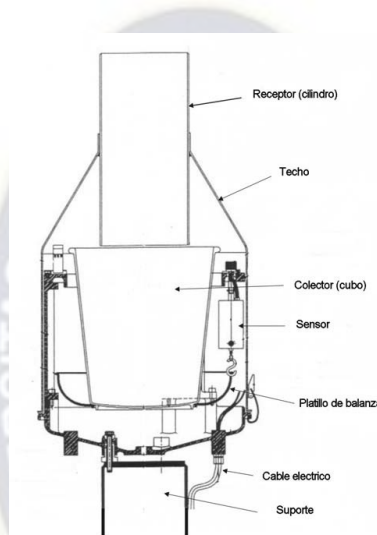


Figura 5.6: Esquema del pluviógrafo a pesadas GEONOR. Fuente: Francou et al. (2004a)

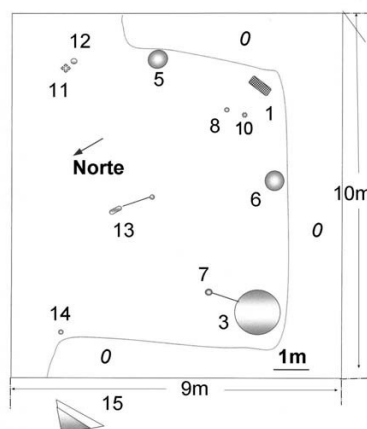


Figura 5.7: Plano de la estación ORE-Zongo. Los números de código se refieren a la tabla 5.1, con  $N^\circ 0$  : zona para pisar,  $N^\circ 14$  : Palo para fotos, 15, ángulo para la toma de la foto 5.8. Fuente: Francou et al. (2004a)





Figura 5.8: Foto de la estación ORE -Zongo (T.Berger), 23/12/2004. Los números de código se refieren a la tabla 5.1, en el código 3 se observa una pantalla corta-viento formada por 32 láminas de metal mantenidas por una estructura circular de 1.20 metros de diámetro. Fuente: Francou et al. (2004a)

### Sensor de la nieve.

El sensor posee un cilindro de aproximadamente 7 cm. de diámetro y un generador de 31 cm ubicados perpendicularmente al suelo. Emite ondas ultrasónicas reflejadas por el suelo o la superficie de la nieve, luego mide el tiempo de ida y vuelta de dichas ondas (Código 7 en la figura 5.7) (Francou et al., 2004a).

### Flujómetro.

El flujómetro mide el flujo de calor a través del objeto en el que se incorpora o en el que está montado, en  $W m^{-2}$ . Está termopila mide la diferencia de temperatura en todo el cuerpo compuesto de cerámica y plástico de HPF01 Figura 5.9. Se trata de un pequeño disco plano en baquelita (80 mm de diámetro y 5 mm de espesor) en el cual está incorporada una termopila. Esta termopila proporciona una tensión proporcional a la temperatura diferencial entre sus fases superiores e inferiores. La temperatura representa el flujo térmico atravesando el instrumento. El flujo proporcionado (en  $W m^{-2}$ ) es positivo para un excedente de energía del suelo y viceversa (Código 8 en la figura 5.7 correspondiente) (Francou et al., 2004a).



Figura 5.9: Sensor de flujo de calor HFP01. Fuente: <https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-meters/hfp01-heat-flux-sensor>

### **Temperatura del aire (no ventilada) y temperaturas del suelo.**

Los sensores son termopares de fabricación artesanal. Un termopar se fabrica a partir de un cable de tipo T en cobre-constatán (ref. Campbell A3537), el punto de soldadura se encuentra adherido a una placa de calamina galvanizada de 12.5x12.5 mm, espesor 10/10, esto para obtener una mejor inercia térmica y evitar una conducción del calor a través del cable eléctrico (Código 9 y 10 en la figura 5.7 y foto correspondiente) (Francou et al., 2004a).

### **Velocidad y dirección del viento.**

La veleta y el anemómetro de tipo hélice están reunidos en un solo instrumento de modelo Young 05103 distribuido por Campbell (Código 11 en la figura 5.7 y en la foto correspondiente) (Francou et al., 2004a).

### **Humedad relativa y temperatura del aire (ventilada).**

El higrotermómetro Vaisala HMP45C corresponde a un cilindro de 35 cm de longitud y de 3 cm de diámetro. Ha sido instalado en un abrigo realizado localmente (Figura 5.10) con 2 tubos cilíndricos en PVC de color blanco. La longitud total es de 60 cm con un diámetro exterior de 12 cm. La sonda está instalada en un tubo interno de un diámetro de 8 cm (Código 12 en la figura 5.7 y en la foto correspondiente) (Francou et al., 2004a).

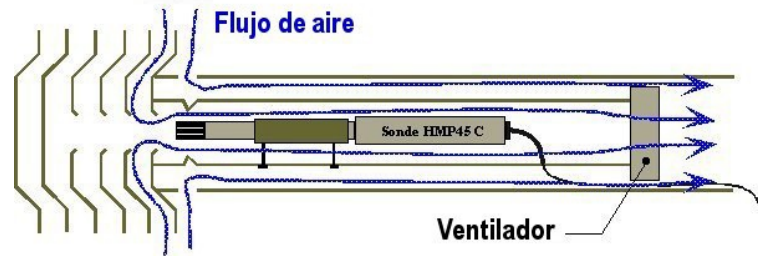


Figura 5.10: Abrigo y mecanismo de ventilación de la sonda higrotermométrica Vaisala HMP45C. Fuente: [Francou et al. \(2004a\)](#)

### Radiaciones de ondas cortas y de ondas largas.

La figura [5.11](#) representa el radiómetro de marca Kipp & Zonen, modelo CNR1 incluyendo a la izquierda un doble piranómetro para la medición de las radiaciones solares de ondas cortas (SW: “Short Wave”) y a la derecha un doble pirgeómetro para la medición de las radiaciones de ondas largas (LW: “Long Wave”). Cada sensor es denominado como “doble” ya que permite medir simultáneamente las radiaciones incidentes procedentes de la atmósfera y aquellas reflejadas o emitidas por el suelo (código 13 en la figura [5.7](#) y en la foto correspondiente) ([Francou et al. 2004a](#)).



Figura 5.11: Radiómetro Kipp & Zonen, modelo CNR1. Fuente: [Francou et al. \(2004a\)](#)

En el estudio se consideraron ocho variables meteorológicas: temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, albedo, velocidad de viento, equivalente de agua de nieve, radiación global (radiación de onda corta y onda larga) y un modelo de elevación digital (DEM) que tiene una resolución espacial de 30 metros para el efecto sombra sobre el glaciar Zongo. El estudio abarcó dos años hidrológicos desde el 01 de septiembre de 2004 hasta el 31 de agosto de 2006.

### 5.1.3. Medidas realizadas sobre el glaciar, estación SAMA.

Para medir todos los flujos energéticos en la interfaz glaciar-atmósfera, se instaló un tipo de estación meteorológica llamado SAMA (Station Automatique Météorologique d’Altitude) en Agosto 2004 ([Ginot et al., 2010](#)).

Estación en el glaciar (figura [5.12](#)) se tiene:

- Sistema de adquisición de datos, CR1000 de Campbell Scientific.
- Temperatura y Humedad Relativa del aire, CS215 de Campbell Scientific.
- Velocidad y dirección del viento, Windsonic de Gill.
- Profundidad de la nieve, SR50A de Campbell Scientific.
- Radiación, CNR1 de Kipp & Zonen.



Figura 5.12: Estación en el glaciar. Fuente: Romain Biron

#### 5.1.4. Síntesis

Recapitulando la altura y las mediciones de los diferentes instrumentos (Ginot et al., 2010).

- Temperatura del aire
  - a 4750 m: dos medidas en la Plataforma, MEVIS
  - a 5050 m sobre la morrena (ORE, temperatura ventilada y no ventilada)
  - a 5050 sobre el glaciar (SAMA, temperatura ventilada)
- Temperatura del suelo
  - a 4750 m: dos medidas en la MEVIS

a 5050 m (ORE, a 0 cm, -10 cm, -30 cm)

- Humedad relativa
  - a 4750 m (MEVIS)
  - a 5050 m sobre la morrena (ORE)
  - a 5050 m sobre el glaciar (SAMA)
  
- Radiaciones solares incidentes y reflejadas (ondas largas y cortas)
  - a 4750 m (MEVIS), solo radiaciones de ondas cortas directa
  - a 5050 m sobre la morrena (CNR1, ORE)
  - a 5050 m sobre el glaciar (CNR1, SAMA)
  
- Radiación neta
  - a 5050 m (ORE)
  - a 5050 m sobre el glaciar (SAMA)
  
- Flujo suelo atmósfera
  - a 5050 m (ORE)
  
- Velocidad y dirección del viento
  - a 4750 m (MEVIS, medida “alta”, la dirección no es medida)
  - a 5050 m (ORE)
  - a 5050 m sobre el glaciar (SAMA)
  
- Lluvia
  - a 4750 m dos medidas, diaria (poco confiable) y mensual
  - a 4830 m, a 4855 m, a 4860 m, a 4945 m, a 5080 m, a 5050 m (\*3), a 5165 m
  
- Altura de nieve
  - a 5050 m (ORE)

## 5.2. Datos Hidro-glacio-meteorológicos.

### 5.2.1. Temperatura del Aire.

Las temperaturas del aire medidas en las estaciones Zongo-m, Zongo-g y Chacaltaya mostraron variaciones diarias y estacionales similares (Figura. 5.13). En general, Zongo-g registró temperaturas más bajas en comparación con las otras estaciones. Esta diferencia de temperatura fue causada por el efecto de enfriamiento del glaciar, que resultó principalmente de una mezcla turbulenta del

aire cerca de la superficie de hielo, nieve derretida y la atmósfera suprayacente (Singh, 2001). El efecto de enfriamiento del glaciar se reduce y desaparece gradualmente en áreas de alta elevación donde la temperatura del aire está constantemente por debajo de cero. Los datos observados sugieren que esta diferencia varía de  $-1$  a  $-4^{\circ}\text{C}$ . Por esta razón, las temperaturas de la estación Zongo-m se usaron para ejecutar el modelo. Los registros faltantes se llenaron por regresión lineal múltiple con el par de estaciones adicionales ( $r = 0.87$ ,  $n = 730$ ) (ver Fuchs, 2013).

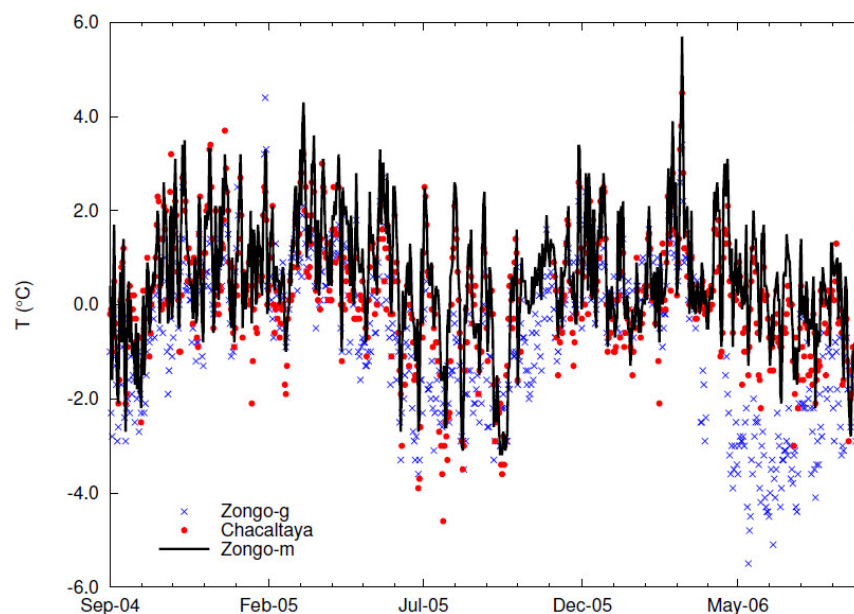


Figura 5.13: Temperaturas diarias del aire registradas en Zongo y Chacaltaya. La línea continua corresponde a los datos utilizados para ejecutar el modelo y los puntos indican la temperatura medida en las estaciones restantes. Fuente: Fuchs (2013)

### 5.2.2. Humedad Relativa.

En Zongo y Chacaltaya, la humedad relativa muestra grandes diferencias espaciales. Por lo tanto, los valores de una sola estación se consideraron representativos de las condiciones prevalecientes. La figura 5.14 ilustra las variaciones temporales de esta variable en Zongo-m. A partir de esta figura, es posible identificar dos temporadas: una temporada húmeda que se extiende de octubre a marzo y una temporada seca de Mayo a Agosto. Septiembre y abril representan meses de transición de la temporada húmeda a la seca (Fuchs, 2013).

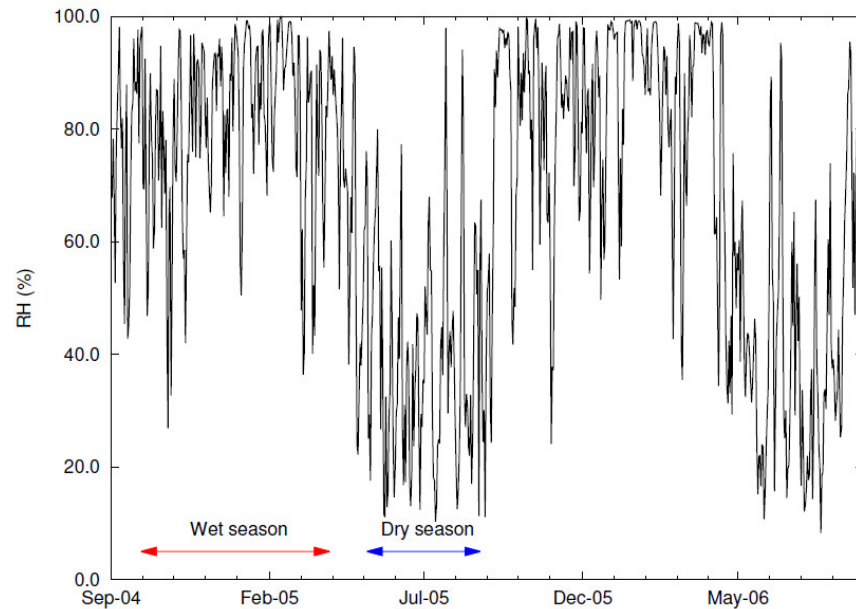


Figura 5.14: Humedad relativa diaria registrada en la estación meteorológica Zongo-m. Fuente: [Fuchs \(2013\)](#)

### 5.2.3. Precipitación.

La precipitación que cayó sobre Zongo fue medida por la estación Plataforma (Figura [5.15](#)), que tenía información completa durante el período de análisis. La precipitación de esta estación fue distribuida uniformemente a cada zona de elevación sin considerar un gradiente de precipitación, pero introduciendo una corrección positiva del 37% debido a la subestimación de la precipitación en este medidor, en comparación con las mediciones de precipitación sólida en el glaciar ([Soruco et al., 2009](#)). Las estaciones húmedas (verano) y secas (invierno) definidas por la humedad relativa coincidieron con el inicio y el cese de la estación lluviosa. Esto fue causado por una mayor presión de vapor que indica la presencia de nubes y la probabilidad de eventos de precipitación, mientras que los bajos valores de humedad determinaron cielos despejados con cantidades reducidas de precipitación. La mayor parte de la precipitación ocurre en verano en los trópicos y los glaciares en esta región pueden considerarse glaciares de “acumulación de verano” donde los procesos de acumulación y ablación ocurren simultáneamente (por ejemplo, [Soruco et al. \(2009\)](#)).

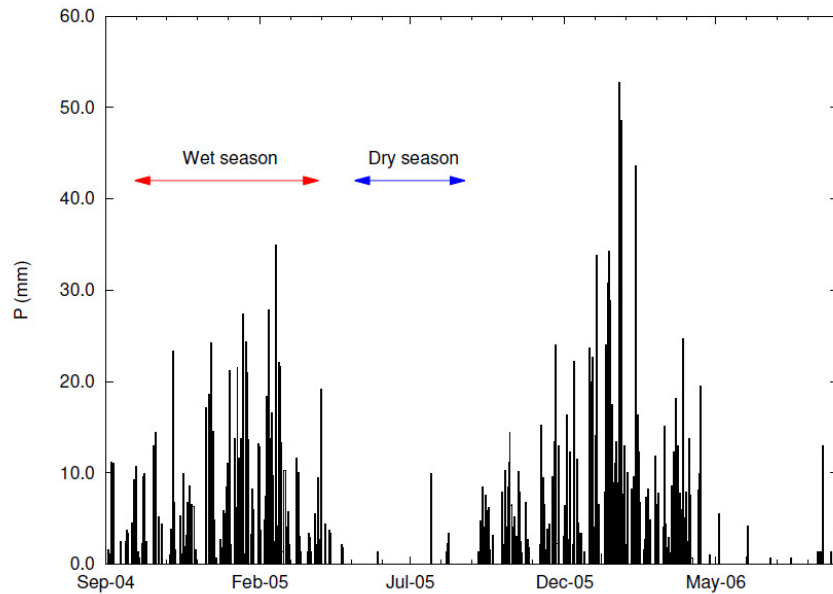


Figura 5.15: Precipitación diaria registrada en la estación meteorológica Plataforma. Fuente: Fuchs (2013)

#### 5.2.4. Radiación de onda corta.

El flujo de energía solar hacia la Tierra en la parte superior de la atmósfera es aproximadamente igual a la constante solar ( $1367 \text{ Wm}^{-2}$ ); varía en un pequeño porcentaje durante un año debido a la excentricidad de la órbita elíptica de la Tierra. A medida que atraviesa la atmósfera, la radiación solar se dispersa y absorbe parcialmente por gases, gotas de agua, cristales de hielo y partículas. El flujo solar total que llega al suelo se llama insolación o radiación global y suma tres componentes: el haz solar directo, la radiación difusa que llega desde todas las direcciones del cielo debido a la dispersión y la radiación reflejada del terreno circundante Figura 5.16 (Cuffey and Paterson, 2010).

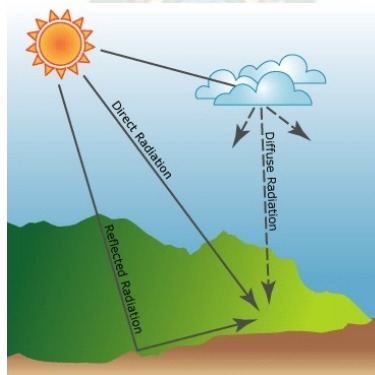


Figura 5.16: La radiación solar entrante es interceptada como componentes directos, difusos o reflejados. Fuente: <https://www.esri.com/en-us/about/about-esri/overview>



La retrodispersión de la radiación de onda corta de la nieve y el hielo varía con la longitud de onda, y generalmente se administra como un albedo de superficie de banda ancha que generalmente varía entre 0.20 y 0.85. El albedo en un sitio se puede evaluar midiendo la radiación solar reflejada hacia abajo y la radiación entrante simultáneamente. Este procedimiento se utilizó en los sitios de estudio. Cada vez que se determinaba que el albedo era mayor que uno, lo que ocurría ocasionalmente porque los copos de nieve se adherían al sensor que miraba hacia arriba durante la nevada, la radiación de onda corta entrante se ajustaba para producir un valor máximo de 0.95. La Figura 5.17 muestra la variación temporal de la radiación global y el albedo en el glaciar Zongo medido en la estación Zongo-g. La información faltante se llenó utilizando estaciones vecinas con datos disponibles (por ejemplo, Zongo-m) que estaba altamente correlacionado con las estaciones de referencia ( $r > 0.94$ ) (ver Fuchs, 2013). Las observaciones mostraron grandes variaciones de radiación global y transformaciones rápidas de albedo en la estación húmeda causadas por la alternancia de procesos de acumulación y ablación.

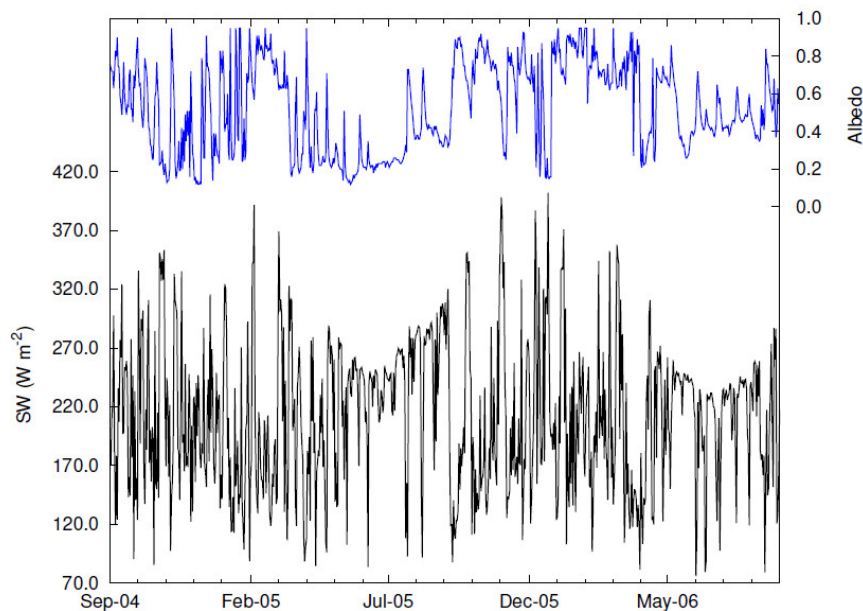


Figura 5.17: Radiación global observada (línea negra) y albedo (línea azul) en Estación Zongo-g. Fuente: Fuchs (2013)

### 5.2.5. Radiación de onda larga.

En las longitudes de onda infrarrojas, la nieve, el hielo y el agua líquida se emiten como radiadores casi perfectos, con emisiones típicas de  $\varepsilon = 0.94$  a  $0.99$ . La radiación de onda larga emitida es así:

$$E_L^\dagger = \varepsilon * \sigma * T_s^4 \quad (5.1)$$

Donde  $\varepsilon$  es la emisividad del cielo,  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzmann y  $T_s$  es la temperatura de superficie. Para derretir nieve o hielo,  $T_s = 273.15^\circ\text{C}$  y  $E_L^\dagger = 315.6\text{Wm}^{-2}$ . La radiación de

onda larga descendente se origina como emisiones de las nubes y del vapor de agua atmosférico, dióxido de carbono, ozono, metano y otros gases de efecto invernadero.

El flujo de dicha radiación en la superficie depende de la cantidad y temperatura de estos componentes a diferentes alturas. No se realizó el procesamiento de datos para la radiación de onda larga, ya que no se requería como entrada para el modelado. Los registros completos del IRD estuvieron disponibles para Zongo durante seis meses (marzo, abril, agosto, septiembre y diciembre de 2005 y mayo de 2006) y la radiación neta mensual de onda larga varió entre  $-30$  y  $-120 \text{ W m}^{-2}$  debido al aire frío, seco y de baja densidad a altitudes elevadas (Wagnon et al. (1999b); Cuffey and Paterson (2010)).

### 5.2.6. Datos hidrológicos.

Las series de tiempo de descarga sólo estaban disponibles en Zongo. Un sensor de presión instalado en una estación hidrométrica a 4830 m s.n.m. registró los niveles de agua originados por la lluvia y la fusión de los glaciares (ver Figura. 5.1) y las profundidades diarias del agua se transformaron en descargas diarias utilizando una curva de calibración.

La figura 5.18 ilustra la estacionalidad de la descarga diaria observada durante el período de estudio. Las descargas máximas ocurren durante la época húmeda (verano), mientras que las descargas bajas se encuentran en la época seca (invierno). Esta respuesta está controlada por el balance energético de la superficie y el sistema hidráulico del glaciar (Fuchs, 2013).

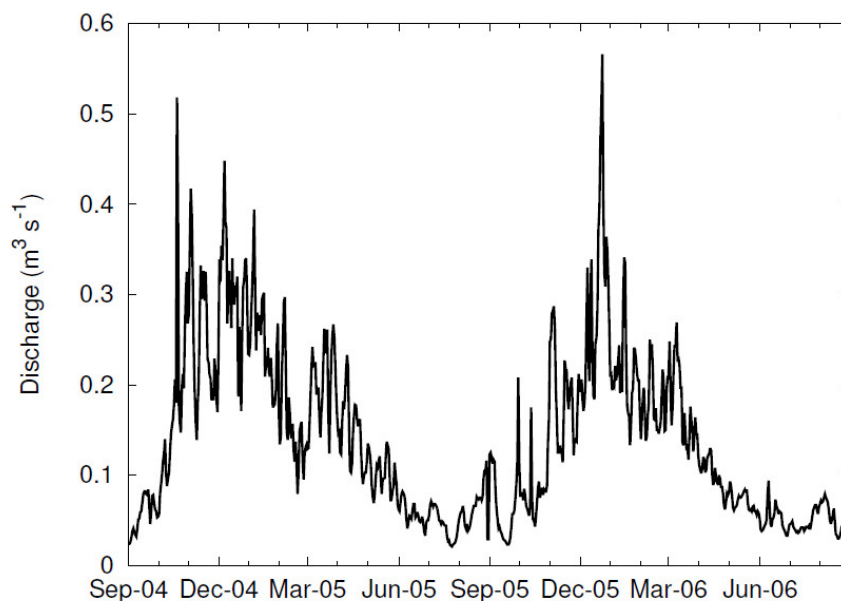


Figura 5.18: Descarga diaria observada en Zongo. Fuente: Fuchs (2013)

### 5.2.7. Datos glaciológicos.

El balance de masa glacial de Zongo se midió por el método glaciológico (Cuffey and Paterson, 2010). Este método consiste en adquirir mediciones de campo de la masa de nieve acumulada anual

(por ejemplo, pozos de nieve) y el descenso de la superficie cubierta de hielo de la superficie (por ejemplo, estacas de ablación) en una red de puntos a lo largo de la superficie del glaciar (stakes en Figura. 5.19). En la zona de acumulación, se deben medir tanto el espesor como la densidad de la capa anual. El cubrimiento de estacas colocadas en la nieve se puede medir de año en año. En la zona de ablación, las estacas colocadas en agujeros perforados en el hielo de la masa glacial se utilizan como referencias. La distancia entre la parte superior de la estaca y la superficie del hielo se mide al principio y al final del año de balance (septiembre y agosto respectivamente). La diferencia de estas longitudes de estacas, da el espesor agregado o eliminado; multiplicando por la densidad del hielo lo convierte en masa. La precisión de las mediciones de balance de masa con estos métodos puede ser difícil de evaluar, la principal fuente de inexactitud radica en los problemas de muestreo espacial. Las mediciones se pueden realizar sólo en un número limitado de puntos y muchos glaciares tienen grandes áreas con grietas donde no es posible realizar mediciones (por ejemplo, Sicart et al. (2007)). Las observaciones del balance de masa mensual y anual de septiembre de 2004 a agosto de 2006 se utilizaron para la prueba del modelo.

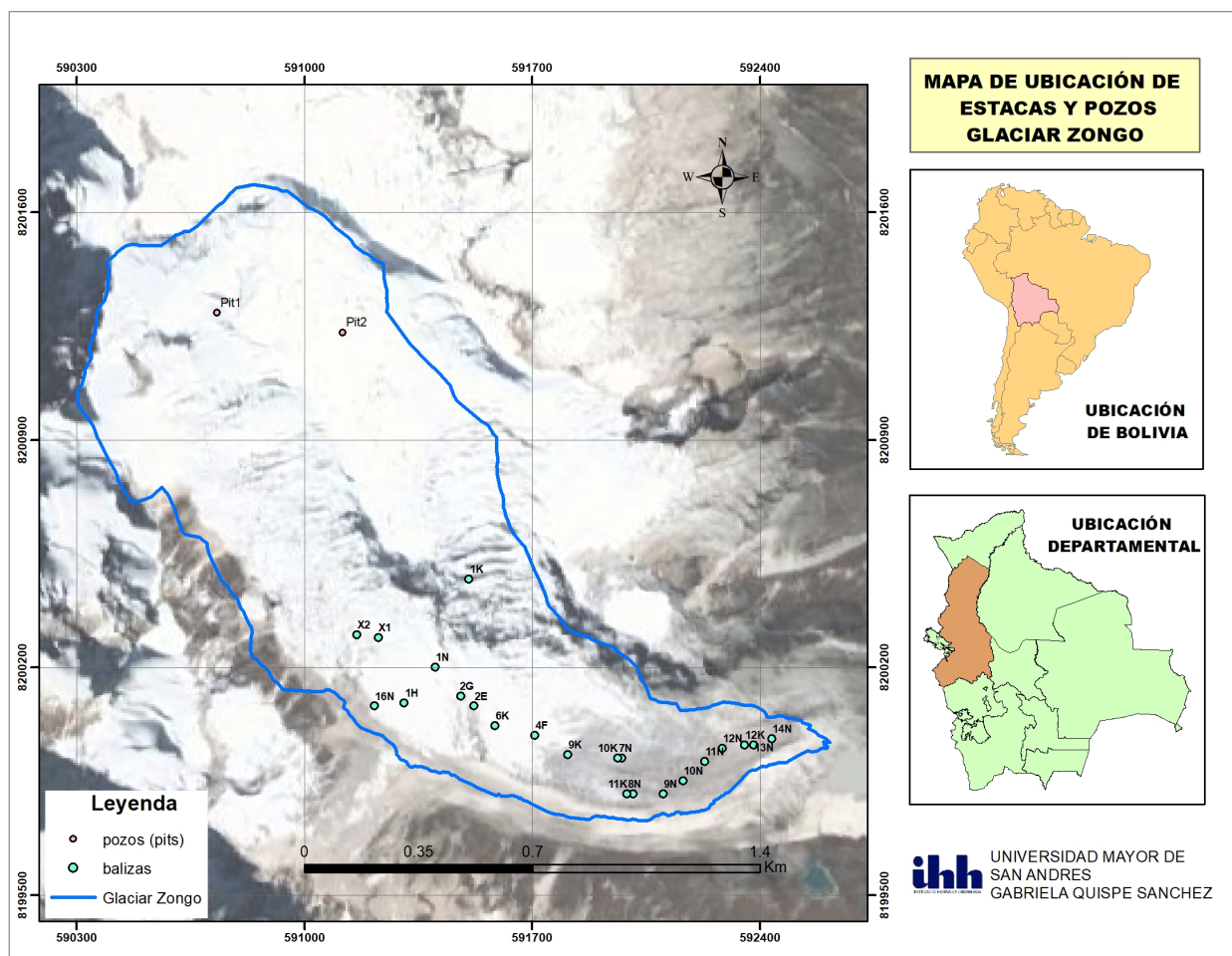


Figura 5.19: Localización de las balizas y pozos en el glaciar Zongo, Cordillera Real, La Paz-Bolivia. Fuente: Elaboración propia.

## Datos de balizas

Una baliza es una estaca que se utiliza para registrar las variaciones de altura del manto nival. Se han empleado tubos de PVC de diámetros pequeños (una pulgada), los que son de bajo costo y fácil adquisición. Estos son livianos para su transporte y al ser fabricados en serie, se les puede unir en forma más sencilla y son resistentes a las extremas condiciones atmosféricas (como temperaturas bajas), pero cede con facilidad al peso de la nieve o a vientos fuertes. Una opción más reciente y que ha dado buenos resultados, es el uso de tubos de aluminio que son resistentes a condiciones meteorológicas adversas (como ablación muy fuerte), pero la desventaja es que son más caros y pesan más que los tubos de PVC.

Dependiendo de la densidad de la nieve, las balizas se entierran en la superficie nival manualmente o con la ayuda de perforadores de vapor o tirabuzón (Figura 5.20).



Figura 5.20: Instalación de una baliza utilizando el sistema de perforación tipo barreno. Fuente: Daniela Carrión.

Para este método inicialmente se requiere confeccionar una cartilla de mediciones puntuales estandarizada e informativa. Además debe ser breve y rápida de recopilar por el personal encargado de dicho procedimiento y fácil de comprender en una fase de análisis posterior. Una preparación cuidadosa de esta ficha asegura que la información contenida en ella pueda ser complementada de manera fácil con lecturas realizadas en otras visitas.

## 5.3. Datos Espaciales del terreno.

Este estudio utiliza el radiómetro avanzado de emisión y reflexión térmica espacial (ASTER) de 30 m de resolución como modelo de elevación digital global (GDEM) para simular el terreno topográfico en los modelos.

ASTER es un sensor óptico de alta eficiencia que cubre una amplia región espectral desde la región infrarroja visible hasta el infrarrojo térmico por 14 bandas espectrales. Los productos generados por ASTER tienen un amplio rango espectral, resoluciones espaciales de 15 m (región espectral infrarroja visible y cercana), 30 m (región espectral infrarroja de onda corta) y 90 m

(región espectral infrarroja térmica) y el telescopio habitual de aspecto nadir y un telescopio que mira hacia atrás para producir imágenes estereoscópicas adquiridas en una sola órbita (Systems, 2012). Los datos de ASTER son aplicables para definir minerales y rocas en la exploración de recursos, monitoreo ambiental como vegetación, monitoreo de actividad volcánica y otros.

Aunque un DEM de resolución de 30 m no captura completamente la complejidad topográfica real en un valle glacial, sirve como una representación espacial del terreno adecuada para evaluar el efecto general de la topografía a la radiación solar dentro de nuestro marco teórico.

### **Modelo de Elevación Digital.**

El GDEM ASTER cubre superficies de tierra entre 83°N y 83°S. El ASTER GDEM se distribuye en formato de archivo GeoTIFF con coordenadas geográficas de longitud/longitud y una cuadrícula de un arco-segundo (30 m) de registros de elevación. Está referenciado al geoide WGS84/EGM96. Los estudios para validar y caracterizar el GDEM ASTER confirman que las precisiones para este producto global son de 20 metros al 95 % de confianza para los datos verticales y de 30 metros al 95 % de confianza para los datos horizontales (Tachikawa et al., 2011).

Para el modelo de terreno en este proyecto se descargó un DEM para la zona de estudio Figura 5.21 y se procesó utilizando el código “Toposol” realizado en el lenguaje de programación R por Mateo Olson, donde se obtuvieron las características geográficas y topográficas necesarias para el estudio. La Figura 5.22 muestra el Modelo Digital de Elevación (DEM) para el glaciar Zongo, este DEM no debe ser tratado por ninguna aplicación, debe ser el que se obtiene cuando se descarga de cualquier página gratuitamente. Para el uso en el código “Toposol” se recomienda usar el DEM con una topografía circundante mayor o igual a cinco kilómetros, para que el código pueda considerar los efectos de sombreado en la topografía circundante alrededor de glaciar.

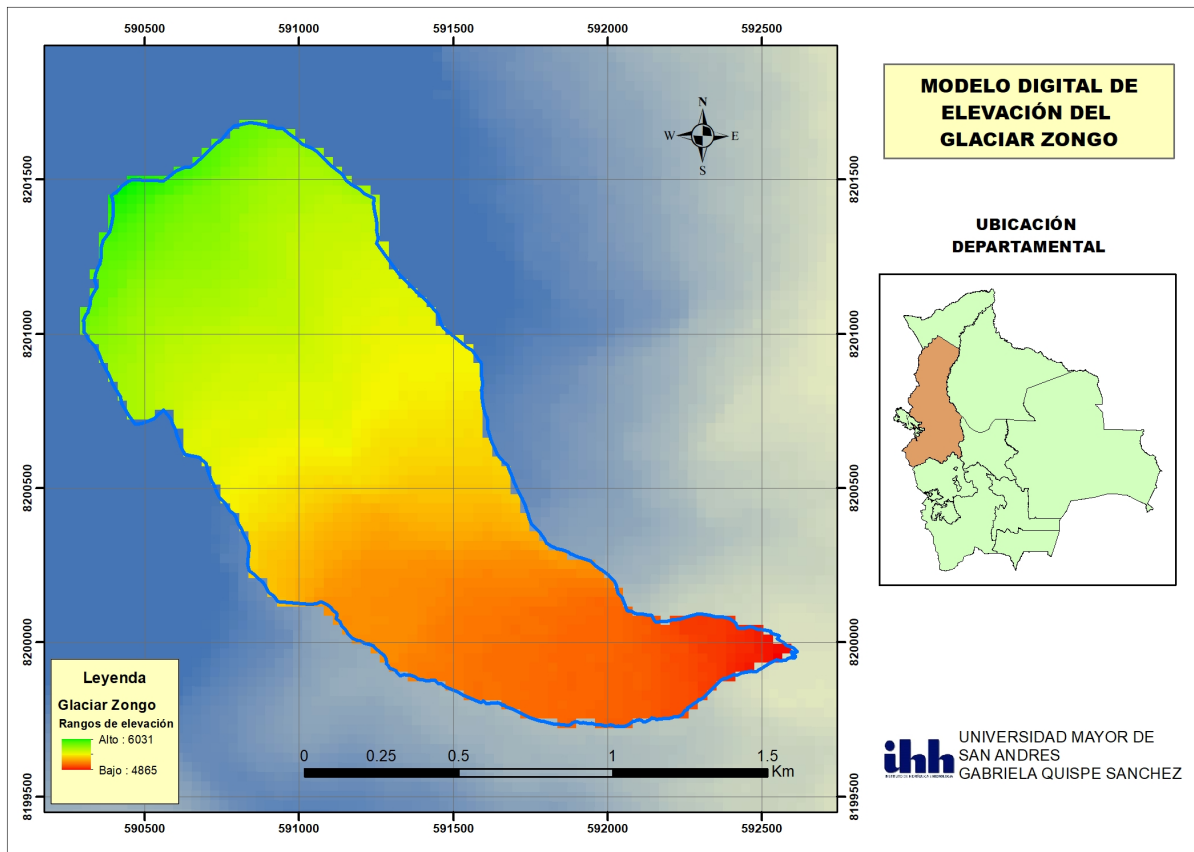


Figura 5.21: Modelo Digital de Elevación DEM del glaciar Zongo. Fuente: Elaboración Propia

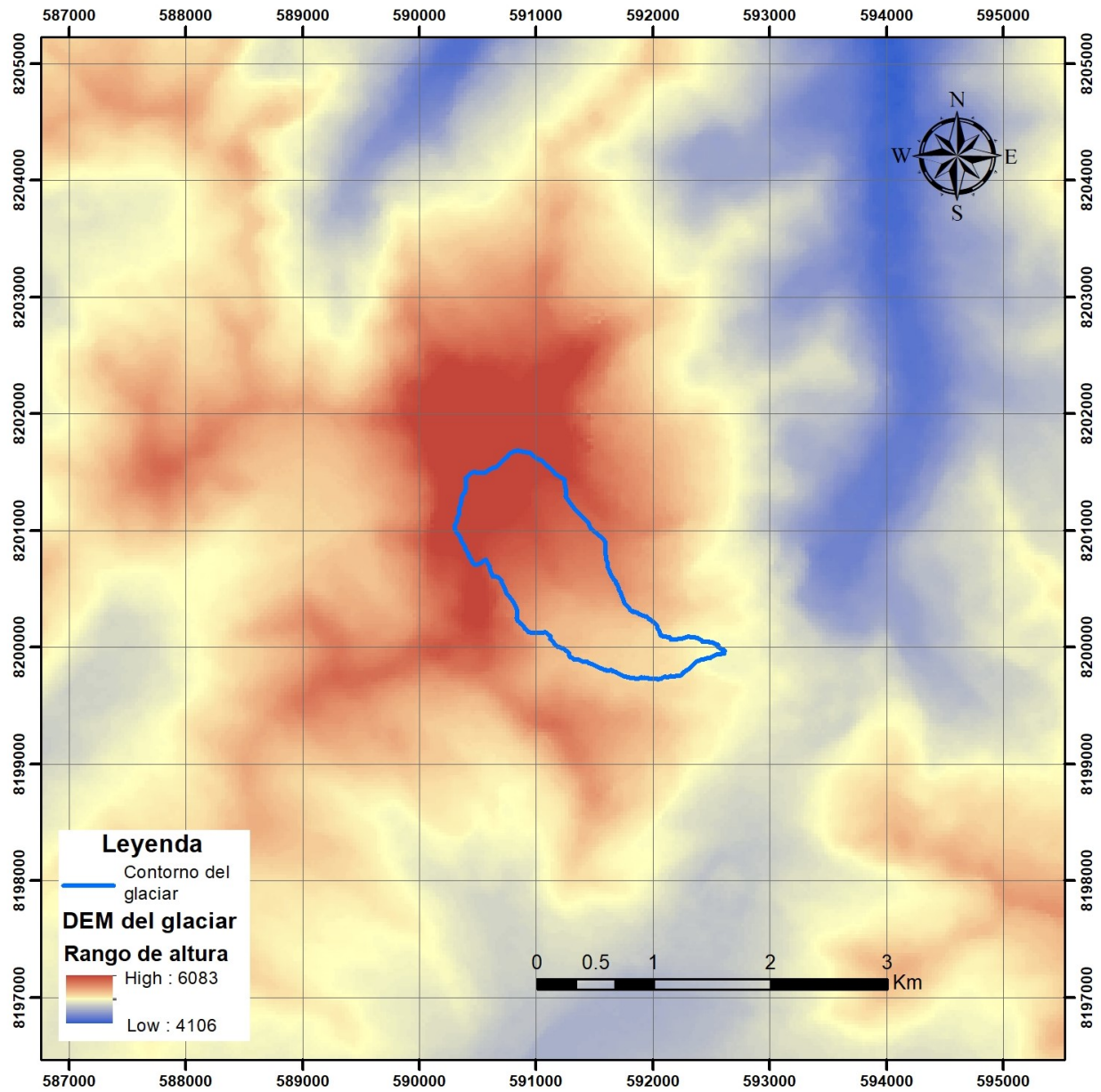


Figura 5.22: Modelo Digital de Elevación DEM del glaciar Zongo. Fuente: Elaboración Propia

# Capítulo 6

## Balance de masa glaciar: conceptos y técnicas de medida

### 6.1. Modelos de derretimiento

#### 6.1.1. Balance de Masa

Diversos autores han provisto el marco conceptual básico del término “balance de masa”. Mencionaremos por ejemplo a [Cogley et al. \(2011\)](#), que define balance de masa como el cambio en la masa de un glaciar, o parte de un glaciar, durante un período determinado, o alternativamente, que lo definen como la diferencia de la acumulación y la ablación en un lapso de tiempo dado. Basándose en lo anteriormente descrito, el glaciar es concebido como “sistema” o flujo de caja, donde la acumulación representa una entrada o ganancia de masa y será representada con un signo positivo. Por el contrario, la ablación representa la salida de flujo del sistema, o pérdida de masa, y será representada con un signo negativo ([Francou et al., 2004a](#)).

El balance de masa se produce por el intercambio entre el glaciar y la atmósfera. Estas contribuciones se realizan por varios procesos (por ejemplo, nevadas, deposición de avalancha, fusión, re-congelación del agua, sublimación y deposición del viento) que determinan la tasa de balance de masa superficial en un punto ([Cuffey and Paterson, 2010](#)). Si se supone que las nevadas, deshielo y sublimación dominan el balance de masa, entonces el cambio de balance de masa del glaciar ( $bs$  en mm w.e.) puede ser aproximado por:

$$b_s = a - M - s \quad (6.1)$$

Donde  $bs$  es el balance de masa,  $a$  (mm equivalente agua w.e.) representa nevadas (precipitación sólida),  $M$  (mm w.e.) es fusión/derretimiento,  $s$  (mm w.e.) significa sublimación.

#### 6.1.2. Zonas de un glaciar

Desde el punto de vista del balance de masa, un glaciar se divide en dos zonas: zona de acumulación, localizada en la parte alta del glaciar, donde a lo largo del año las ganancias de masa son superiores a las pérdidas, y la zona de ablación, situada en la parte baja del glaciar, donde se da la situación contraria (Figura [6.1](#)). La línea de equilibrio es la frontera entre las zonas de acumulación y ablación Figura [6.2](#)



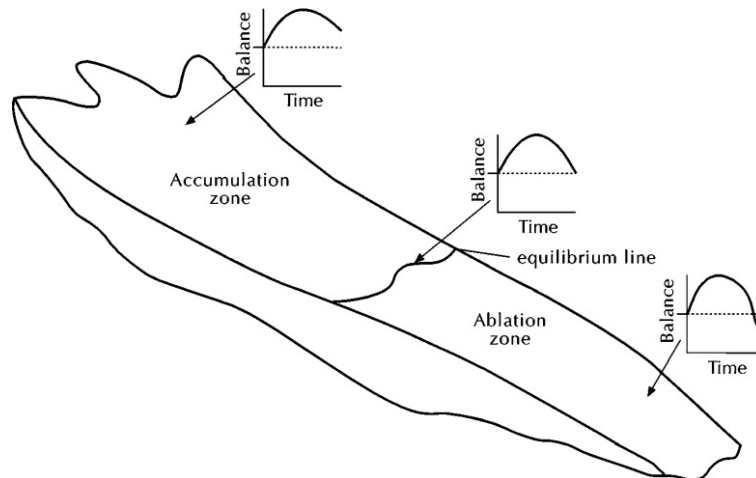


Figura 6.1: Zonas de un glaciar en función de los procesos del balance de masa de un glaciar, donde se muestran las curvas típicas estacionales del balance de masa a lo largo del año (las curvas son idealizaciones). Fuente: [Cuffey and Paterson \(2010\)](#)

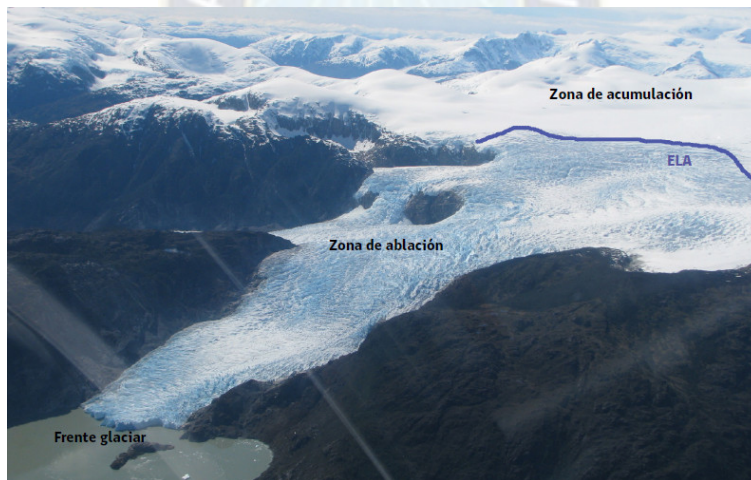


Figura 6.2: Esquema de zoificación glacial línea de equilibrio (ELA). Fuente: Andrés Rivera

Las zonas en un glaciar a su vez se dividen normalmente en varias subzonas, (según los procesos de transformación y propiedades de la nieve depositada) de la zona de acumulación (Figura [6.3](#)) de un glaciar. Definieron cinco zonas, según sus características y el material subyacente para un año típico.

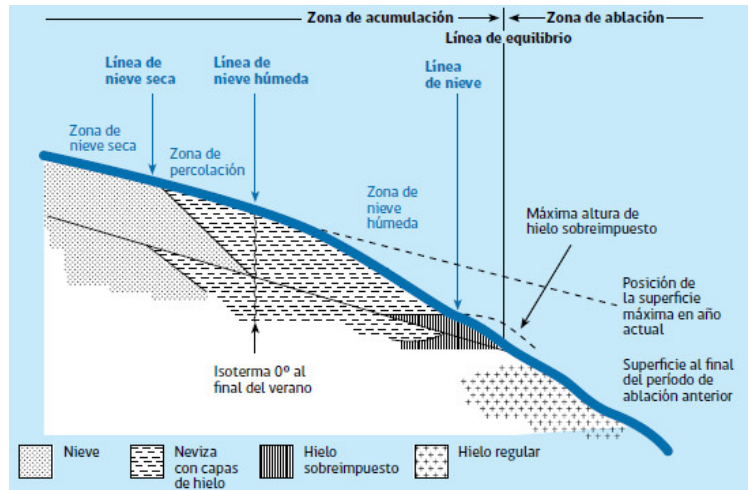


Figura 6.3: Subzonas de un glaciar. Fuente: Cuffey and Paterson (2010)

Según se ilustra en la Figura 6.3, en la zona más alta del glaciar se localiza la zona de nieve seca, donde ésta no se funde ni siquiera en verano. La línea de nieve seca marca el límite entre esta zona y la siguiente, denominada zona de percolación. Gran parte de la fusión de la superficie ocurre en esta zona. El agua puede infiltrarse a través de la nieve a temperaturas inferiores a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  antes de volver a congelarse (recongelación), lo que lleva consigo la formación de una capa de hielo. La recongelación es el factor más importante para calentar la nieve, ya que la recongelación de un gramo de agua libera suficiente calor latente como para elevar la temperatura de 160 gramos de nieve en  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La cantidad de agua de fusión producida durante el verano normalmente aumenta al disminuir la elevación. Así, a medida que descendemos por el glaciar, se llega a un punto donde, al final del verano, la temperatura de toda la nieve depositada desde el final del verano anterior ha sido elevada hasta la temperatura de fusión. En este punto, la línea de nieve húmeda define el límite con la siguiente zona, denominada zona de nieve húmeda. En esta zona, al final del verano, toda la nieve depositada desde el final del verano anterior se ha calentado a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La percolación en estas capas puede desarrollarse por debajo de la zona de percolación. Es importante averiguar dónde sucede esto, ya que, de ser así, las mediciones de balance de masa no pueden restringirse a la capa del año actual. En las zonas de percolación y nieve húmeda, el material consiste en capas de hielo, separadas por capas y parches de nieve. Sin embargo, a menor elevación, las capas de hielo se fusionan, dando lugar a la zona de hielo superpuesto. Esta zona tiene un incremento anual de hielo superpuesto en la superficie y en la parte inferior de la zona de nieve húmeda, pero enterrado debajo de la neviza (firn). La línea de nieve o línea de neviza es el límite entre la nieve húmeda y las zonas de hielo superpuesto (límite entre la neviza y el hielo en la superficie glaciar). Su ubicación puede determinarse fácilmente por observaciones al final de la temporada de fusión; el límite inferior de la zona de hielo superpuesto es la línea de equilibrio. Un glaciar está en equilibrio cuando su balance de masa es igual a 0 a medio o a largo plazo, asumiendo que las condiciones anuales suelen ser diferentes de 0, reflejando las particularidades climáticas del año en cuestión. Si un glaciar se encuentra en equilibrio, su frente no avanza ni retrocede, y la superficie mantiene su cota y la forma. Para que tenga sentido, y no refleje solamente las condiciones climáticas de un año en particular, el balance de masa de un glaciar debe medirse durante al menos varios años (Cuffey and Paterson, 2010). El área localizada por debajo de la línea de equilibrio es la zona de ablación.

Aquí, la superficie del glaciar pierde masa al final del año.

## 6.2. Métodos de estimación del balance de masa.

Existen diferentes métodos para realizar la cuantificación de ganancias o pérdidas de masa de un glaciar, como los métodos directos (método glaciológico), métodos indirectos (métodos hidrológicos), métodos topográficos (método geodésico) y en algunos casos métodos combinados. Por lo general el balance de masa glaciar se realiza para cada ciclo climático/hidrológico, (anual) (Francou et al., 2004a).

### 6.2.1. Método directo o balance glaciológico.

El método más comúnmente utilizado mide directamente en terreno el cambio de masa del glaciar. Esta medición se lleva a cabo a partir de la instalación de una red de estacas (llamadas balizas, balises, stakes) en la mayor parte del glaciar. En su sección alta, donde generalmente la acumulación supera la ablación, se excavan pozos (puits, pits) o se hacen perforaciones (carottages, drilling) donde se mide directamente la cantidad de nieve o de hielo acumulado entre el inicio y el fin del año hidrológico. Posteriormente, por densimetría la capa de hielo es convertido en equivalente de agua (Francou et al., 2004a).

La diferencia de la superficie de nieve o hielo registrada en balizas o estacas que son visitadas sucesivamente (Figura 6.4), estas diferencias ponderadas por la densidad de la nieve o del hielo de la superficie del glaciar en el lugar donde se ubica la baliza, permiten calcular un balance de masa puntual. Las balizas son normalmente instaladas en un glaciar mediante un taladro. La altura de la baliza sobre la superficie es medida en cada visita de terreno. También se registra la densidad del manto superficial en cada baliza (a través de una calicata, también llamado pozo estratigráfico, o bien extrayendo un testigo de nieve somero) (Rivera et al., 2016).



Figura 6.4: Medición de una baliza. Glaciar Rita Cuba Blanco, Sierra Nevada de el Cocuy, Colombia. Fuente: (Rivera et al., 2016)

La medición de la altura de la baliza sobre la superficie ( $z$ ) se realiza a fin de mes ó a mas tardar en los primeros días del mes siguiente. Esta medición va acompañada de la medición de la altura

de nieve (y) con ayuda de una sonda graduada para nieve dentro de un círculo de medio metro de diámetro en la vecindad de la baliza (se considera el valor mas representativo). Como es conocida la longitud de la baliza es suficiente medir z e y para el calculo del balance de masa. La Figura 6.5 ilustra este principio de medición (Rivera et al., 2016).

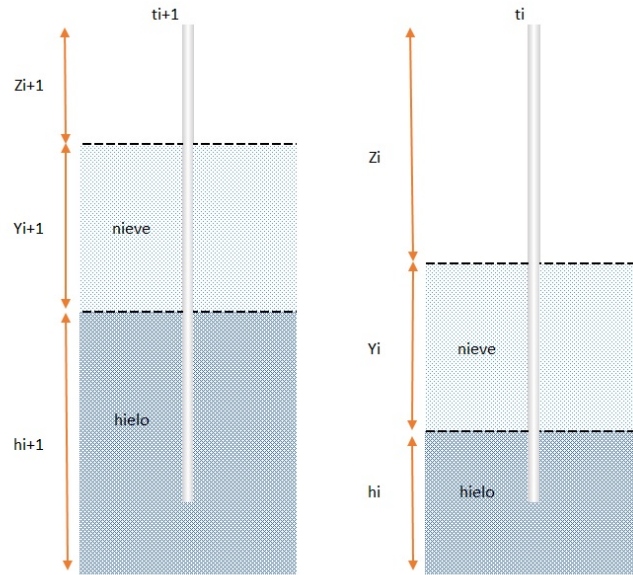


Figura 6.5: Diagrama esquemático de la variación de la altura en un glaciar para dos instantes consecutivos. Aquí puede observarse la altura de la emergencia (z), nieve (y) y hielo (h) para los instantes respectivos. Fuente: Rivera et al. (2016)

### Aplicación del método glaciológico

La ecuación básica del balance (b) de masa en un punto del glaciar para un instante,  $db/dt$ , se escribe básicamente como:

$$\frac{db}{dt} = \rho \frac{dh}{dt} + \int \frac{d\rho}{dt} dy \quad (6.2)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del hielo de espesor h que varía según el tiempo t. El primer término del lado derecho de la ecuación representa el cambio de masa de hielo (con densidad constante). El segundo término es el cambio de densidad de la columna de nieve de espesor y sobre el periodo de tiempo t (Figura 6.5).

A partir de la ecuación 6.2 y considerando dos instantes de medición,  $t_i$  y  $t_{i+1}$ , se obtiene el balance de masa para el instante i como:

$$b_i = \rho_o \Delta h + (\rho_i y_i - \rho_{i-1} y_{i-1}) \quad (6.3)$$

Considerando  $\rho_i = \rho_{i-1} = \rho$ , se tiene:

$$b_i = \rho_o (h_i - h_{i-1}) + \rho (y_i - y_{i-1}) \quad (6.4)$$

O escribiendo  $h$  en términos de la emergencia ( $z$ , distancia desde la superficie de la nieve fresca hasta el extremo superior de la baliza) (Figura 6.5):

$$b_i = \rho_o(z_{i-1} - z_i) + \rho(y_i - y_{i-1}) \quad (6.5)$$

Donde  $\rho_o$  y  $\rho$  son la densidad del hielo ( $0.9 \text{ g cm}^{-3}$ ) y la nieve ( $0.4 \text{ g cm}^{-3}$ ) respectivamente.

A escala anual, para extender el balance a todo el glaciar se utilizan diversos puntos de medición (balizas y pozos) distribuidos en una red bien definida. El principio básico es el de ponderar el balance medido por el área del rango relativo del glaciar:

$$B_i = \left(\frac{1}{S}\right) \sum b_j s_j \quad (6.6)$$

Donde,  $B_n$  es el balance neto específico del glaciar,  $S$  es la superficie total,  $b_j$  es el balance de masa neto en el rango altitudinal  $j$  y  $s_j$  el área del rango latitudinal  $j$ .

### 6.2.2. Método indirecto o balance hidrológico.

Este método establece una comparación, a escala de tiempo anual, entre la cantidad de hielo acumulado por las precipitaciones sólidas medidas/estimadas ( $P$ ) y la ablación medida/estimada (evaporación y sublimación) ( $E$ ). En él se considera también la fusión como escurrimiento  $R$ , medida directamente a través de una estación limnigráfica ubicada sobre el emisario a poca distancia del glaciar (Paterson, 1994). Luego, una primera aproximación del balance hidrológico ( $Bh$ ) se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$B_h = P - R - E \quad (6.7)$$

Sin tomar en cuenta la sublimación, pero considerando el promedio de las precipitaciones colectadas por los pluviómetros representativos  $P$ , la superficie del glaciar  $S_G$ , el caudal de derretimiento  $D$ , la superficie total de la cuenca donde él se localiza  $S$  y el coeficiente de escurrimiento  $c_e$ , el balance hidrológico  $b_h$  se puede obtener de la siguiente manera:

$$b_h = P - \frac{1}{S_G} [D - (S - S_G) * c_e * P] \quad (6.8)$$

### 6.2.3. Método topográfico (“Método geodésico”)

Se realiza anualmente un levantamiento topográfico detallado del glaciar, con el objetivo de medir su superficie y contorno. Posteriormente, un Modelo Digital de Terreno (MDT) permitirá comparar la topografía medida con aquella de los años anteriores, así como de calcular la pérdida de área y de volumen. Luego, dichas pérdidas repartidas sobre todo el glaciar y convertidas en equivalente agua proporcionan el balance de masa por rango altitudinal. Finalmente, se confecciona un mapa calculando las líneas de igual balance de masa.

Es importante destacar que el presente método se adapta mejor a glaciares de pequeños tamaños o a aquellos en los cuales se efectúan medidas a una periodicidad plurianual (Rivera et al., 2016).

## 6.3. Modelos de fusión.

### 6.3.1. Modelo de escorrentía y deshielo (SRM).

SRM es un modelo de fusión y escorrentía desarrollado por [Martinec et al.](#), (1975) para pequeñas cuencas Europeas. Está diseñado para simular y pronosticar descargas diarias en cuencas hidrográficas de montaña donde el deshielo es un factor importante. Este modelo conceptual es semi-distribuido; la temperatura y la precipitación se extrapolan a la altitud hipsométrica media de las bandas de elevación delineadas a intervalos regulares (ver Capítulo 2, Tabla 2.1). El agua que se origina del derretimiento y la lluvia en cada zona de elevación,  $V_i$  ( $m^3 s^{-1}$ ), se determina como:

$$V_i = (c_{Si} * M_i * S_i + c_{Ri} * P_i) * A_i * \frac{10000}{86400} \quad (6.9)$$

Donde  $c_{Si}$  y  $c_{Ri}$  son coeficientes de escorrentía para el deshielo y lluvia, respectivamente,  $M_i$  ( $cm dia^{-1}$ ) es el derretimiento diario en la zona de elevación  $i$ ,  $S_i$  es la relación entre el área cubierta de nieve y el área total de la zona  $i$ ,  $P_i$  ( $cm dia^{-1}$ ) es la precipitación diaria en la zona  $i$ ,  $A_i$  ( $km^2$ ) es el área de la zona  $i$ , y  $10000/86400$  es un factor de conversión de unidades. La profundidad de fusión de la nieve es calculado como:

$$M_i = \begin{cases} a_i * T_i & T_i > 0 \\ 0 & T_i \leq 0 \end{cases} \quad (6.10)$$

Donde  $a_i$  ( $cm ^\circ C^{-1} dia^{-1}$ ) es el factor de grado día y  $T_i$  ( $^\circ C$ ) es la temperatura promedio diaria en la zona de elevación  $i$ . Se utiliza una temperatura crítica preseleccionada de  $+1.50$   $^\circ C$  para decidir si la precipitación se trata como nieve o lluvia. Si ocurre un evento de nieve, su efecto retardado en la escorrentía se trata de manera diferente dependiendo de si cae sobre el glaciar o el área de suelo desnudo de la cuenca. El SRM utiliza observaciones de la cubierta de nieve de imágenes de satélite para realizar un seguimiento de los cambios en el área cubierta de nieve; la presencia de glaciares en una zona de elevación se indica cuando la disminución del área cubierta de nieve se detiene en un nivel dado que corresponde al área del glaciar. Durante una simulación, cualquier nieve nueva que caiga sobre partes libres de nieve de una zona se considera una capa de nieve separada que contribuye a la escorrentía tan pronto como ocurren las condiciones de fusión. Los datos de observación en Zongo muestran que fuera del glaciar, la nieve rara vez dura más de unos pocos días ([Sicart et al.](#), 2011); En este caso, se utiliza la observación del área del glaciar y el cálculo de los cambios en la capa de nieve.

Cuando se determina que la precipitación es lluvia, el SRM lo trata de dos maneras. En la condición inicial, se asume que la lluvia que cae sobre la capa de nieve al comienzo de la temporada de derretimiento es retenida por la nieve, que generalmente es seca y profunda, y la lluvia se agrega a la escorrentía de deshielo solo del área libre de nieve. En una etapa posterior, la nieve madura y la capa de nieve libera una cantidad de agua proporcional a la lluvia que cae sobre la capa de nieve; en este caso, la lluvia de toda el área de la zona se agrega al deshielo ([Martinec et al.](#), 2008). Los glaciares tropicales pueden considerarse como glaciares templados donde el hielo en la zona de ablación se encuentra en el punto de fusión, excepto por una capa superficial de unas pocas décimas de centímetro de espesor ([Sicart et al.](#), 2005), en la que la temperatura cae por debajo de  $0^\circ C$  durante parte del año; los eventos de nevadas generalmente ocurren durante períodos relativamente cálidos durante los cuales la nieve se vuelve pesada tan pronto como cae y la transformación de la

nieve húmeda conduce a un rápido aumento de la densidad a valores cercanos a los  $400 \text{ kg m}^{-3}$  (Francou et al., 2003). En contraste, se puede encontrar una zona de nieve seca de hielo frío donde no se produce fusión a gran altura en los glaciares tropicales.

Los datos meteorológicos son extrapolados usando funciones simples de altitud. La temperatura del aire se ajusta utilizando una función que depende de la elevación como se muestra en la siguiente ecuación:

$$T_i = T_{stn} + \gamma * (h_{stn} - h_i) * \frac{1}{100} \quad (6.11)$$

Donde  $T_{stn}$  es la temperatura medida en la estación meteorológica,  $\gamma$  ( $^{\circ}\text{C}$  por 100 m) es el gradiente térmico, y  $h_{stn}$  y  $h_i$  (m s.n.m.) son las altitudes medias de la estación meteorológica y la zona de elevación  $i$ , respectivamente. Del mismo modo, los datos de precipitación se extrapolan por un gradiente de altitud como:

$$P_i = P_{stn} * \left[ 1 + \gamma_p * (h_i - h_{stn}) * \frac{1}{100} \right] \quad (6.12)$$

Donde  $P_{stn}$  (cm) es la precipitación medida en la estación meteorológica y  $\gamma_p$  (% por 100 m) es el gradiente de precipitación con la altitud (Fuchs, 2013).

### 6.3.2. Modelo de índice de temperatura mejorado (ETI)

El modelo de índice de temperatura propuesto por Pellicciotti et al. (2005), calcula la fusión como la suma de dos componentes:

$$M_i = \begin{cases} TF * T_i + SRF * (1 - \alpha_i) * G_i & T_i > T_T \\ 0 & T_i \leq T_T \end{cases} \quad (6.13)$$

Donde  $T$  es la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\alpha$  es albedo y  $G$  es la radiación de onda corta entrante ( $\text{W m}^{-2}$ ). El subíndice “i” denota datos para la zona de elevación  $i$ .  $TF$  ( $\text{mm } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) y  $SRF$  ( $\text{mm m}^2 \text{ W}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) son dos coeficientes empíricos respectivamente, el factor de temperatura y el factor de radiación de onda corta.  $T_T$  es un parámetro adicional y corresponde a la temperatura umbral por encima de la cual se supone que se produce la fusión (Pellicciotti et al., 2005). Los dos parámetros empíricos son recalibrados contra lecturas de estacas y simulaciones de Pellicciotti et al. (2008) y Carenzo et al. (2009) durante los años de estudio de este proyecto, sus valores se muestran en el capítulo 7.

En el modelo, los datos de temperatura son medidos, mientras que  $\alpha$  y  $G$  pueden ser medidas o valores modelados (ver abajo), dependiendo de la disponibilidad de los datos de entrada. En este proyecto, el albedo es internamente calculado por el modelo usando la parametrización propuesta por Oerlemans and Knap (1998). Los datos de entrada para la radiación de onda corta entrante  $G$  son medidos en el sitio. Sin embargo este valor de  $G$  será calculado y estudiado más adelante en este proyecto.

### 6.3.3. Modelo de índice de temperatura mejorado que incluye la parametrización de albedo (ETI + A).

Una mejora adicional del modelo ETI fue la inclusión de la parametrización para evaluar las variaciones espaciales del albedo en cada zona de elevación. Los valores diarios de albedo en una elevación dada fueron simulados utilizando el enfoque ampliamente utilizado presentado por [Oerlemans and Knap \(1998\)](#). Esta parametrización fue considerada debido a su simplicidad en términos de datos requeridos y parámetros de control. El albedo del sitio glacial cubierto de nieve en el día  $n$  disminuye por una función exponencial de los días desde la última nevada  $n_s$  de la siguiente manera:

$$\alpha_{snow} = \alpha_{firn} + (\alpha_{frsnow} - \alpha_{firn}) \exp\left(\frac{n_s - n}{t^*}\right) \quad (6.14)$$

Donde:  $\alpha_{firn}$  representa el albedo característico de la neviza,  $\alpha_{frsnow}$  es el albedo característico de la nieve fresca, y  $t^*$  (d) es un parámetro de escala de tiempo que determina qué tan rápido cambia el albedo de la nieve fresca al albedo  $firn$  después de una nevada. Para dar cuenta de la transición al albedo característico del hielo ( $\alpha_{ice}$ ) cuando la profundidad de la nieve es pequeña, el albedo de las capas delgadas de nieve se calcula como:

$$\alpha = \alpha_{snow} + (\alpha_{ice} - \alpha_{snow}) \exp\left(\frac{-SWE}{d^*}\right) \quad (6.15)$$

Donde  $SWE$  (mm w.e.) es el equivalente en agua (w.e., por sus siglas en ingles) de la capa de nieve sobre el glacial y  $d^*$  (mm w.e.) es un parámetro de escala de la profundidad. Albedos característicos de firn, nieve y hielo, fueron inicialmente obtenidos de una revisión de la literatura por [\(Cuffey and Paterson, 2010\)](#) y luego se ajustaron manualmente a las observaciones del albedo. Los parámetros de escala de tiempo y de profundidad fueron tomados de los autores de la investigación de [\(Sicart et al., 2011\)](#).

Finalmente, se simuló el cambio diario en  $SWE$  como la diferencia, entre nevadas, derretimientos y sublimaciones:

$$SWE_n = \begin{cases} SWE_{n-1} + a_n - (M_n + s_n) & \text{if } SWE_{n-1} + a_n - (M_n + s_n) > 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (6.16)$$

Cada vez que  $SWE_n$  sea igual a cero, el derretimiento del hielo tenía lugar en las zonas de la cuenca del glacial.

Este esquema plantea un problema interesante para paquetes de nieve fina: en cada paso del tiempo, se calculó la precipitación, se actualizó la profundidad de la nieve, se calculó el albedo y la masa fundida, y luego se volvió a ajustar la profundidad de la nieve. Por lo tanto, el albedo era resuelto de forma iterativa [\(Fuchs et al., 2016\)](#).

### 6.3.4. Base física para el modelo de índice de temperatura mejorado.

Al desarrollar su método de índice de temperatura mejorado, [Pellicciotti et al. \(2005\)](#) intentaron combinar la precisión de los modelos de balance de energía basados físicamente con la simplicidad de los enfoques de índice de temperatura. Lo lograron incorporando variaciones en la radiación entrante y el albedo en los cálculos de fusión, y desarrollando más representación física del balance



de energía superficial en el modelo, a través de la separación de fuentes de energía dependientes de la temperatura e independientes de la temperatura.

En esta sección, Fuchs (2013) consideró que el balance de energía superficial del glaciar Zongo se utiliza para investigar la contribución relativa de los componentes del balance de energía para la fusión; la base física de tres parámetros clave del modelo, respectivamente, el factor de onda corta, el factor de temperatura y el umbral de temperatura; y métodos para estimar estos parámetros a partir de características meteorológicas representativas de la cuenca.

### Balance de energía de superficie.

La ecuación de balance de energía gobierna los intercambios de energía entre la superficie de la Tierra y la atmósfera (Figura 6.6). Al definir los flujos de energía como positivos cuando suministran un flujo de energía a la superficie de nieve / hielo y suponiendo que no haya transferencias horizontales de calor en el suelo, el flujo de energía neta en la superficie corresponde a la suma de los siguientes componentes, en  $W m^{-2}$  (Cuffey and Paterson, 2010):

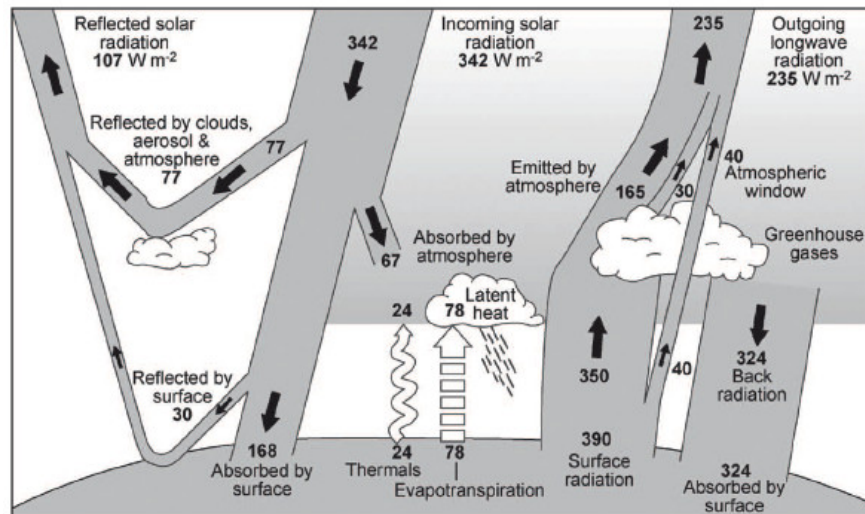


Figura 6.6: Balance energético de la superficie de la Tierra e intercambios con la atmósfera promediados para el mundo en un año. Los flujos se expresan en  $W m^{-2}$ . Fuente: Kiehl and Trenberth (1997)

$$E_N = E_S^\downarrow + E_S^\uparrow + E_L^\downarrow + E_L^\uparrow + E_G + E_H + E_E + E_P \quad (6.17)$$

Donde  $E_S^\downarrow$  es la radiación de onda corta entrante,  $E_S^\uparrow$  es la radiación de onda corta reflejada, y  $E_L^\downarrow$  y  $E_L^\uparrow$  son las radiaciones de onda larga hacia abajo y emitidas; la suma de todos los flujos radiativos da la radiación neta  $E_R$ .  $E_G$  corresponde al flujo de energía subsuperficial,  $E_H$  y  $E_E$  representan los flujos de calor sensible y latente debido a la mezcla turbulenta del aire adyacente a la superficie, y  $E_P$  representa el flujo de calor de precipitación. El último permanece muy bajo en el glaciar Zongo y, por lo tanto, no se toma en cuenta (Sicart et al., 2005). Del mismo modo, al elegir una capa de nieve y hielo lo suficientemente grande como para que las variaciones estacionales de

temperatura no lleguen al fondo de la capa, se puede despreciar el flujo de calor subsuperficial. Los componentes radiativos del balance de energía se midieron en pasos de tiempo horarios y se calcularon las medias mensuales; Los flujos turbulentos se calcularon mediante el método del coeficiente de transferencia utilizando mediciones mensuales de la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento (Fuchs, 2013), de la siguiente manera:

$$E_H = \rho_a * c_a * C_H u [T - T_s] \quad (6.18)$$

y

$$E_E = 0.622 * \rho_a^\circ * L_{v/s} * C_E u [e - e_s] \quad (6.19)$$

Donde  $\rho_a$  es la densidad del aire ( $\rho_a = \rho_a^\circ * P / P_0$ ),  $P$  y  $P_0$  son las presiones estándar y atmosféricas,  $\rho_a^\circ$  es la densidad del aire a presión estándar,  $c_a$  es la capacidad calorífica específica del aire a presión constante,  $L_{v/s}$  es el calor latente de evaporación o sublimación,  $u$  ( $m s^{-1}$ ) es la velocidad del viento y los parámetros adimensionales  $C_H$  y  $C_E$  son llamados coeficientes de intercambio:

$$C_H = \frac{k_o^2}{\ln(z/z_0) \ln(z/z_{0T})} \quad (6.20)$$

$$C_E = \frac{k_o^2}{\ln(z/z_0) \ln(z/z_{0E})} \quad (6.21)$$

En la última ecuación,  $k_0$  es la constante de von Kármán con un valor de 0.4;  $z$  la altura a la que se mide la velocidad del viento, para Zongo es igual a 2.5 metros;  $z_0$  el parámetro de rugosidad de la superficie; y  $z_{0T}$  y  $z_{0E}$  las longitudes de rugosidad para temperatura y presión de vapor, respectivamente. Aquí, se usaron los valores  $z_0 = 10$  mm y  $z_{0T} = z_{0E} = z_0/100$  (por ejemplo, Sicart et al. (2011)). Esta expresión supone una atmósfera neutral y sin correcciones de estabilidad. La presión atmosférica a una altitud dada se puede calcular utilizando las fórmulas de Atmósfera Estándar Internacional (ISA por sus siglas en inglés, Atmosphere (1975)):

$$P = P_0 * \left( 1 - L * \frac{H}{T_0} \right)^{\frac{gM_a}{RL}} \quad (6.22)$$

Donde  $L$  es el gradiente de temperatura para el modelo ISA,  $H$  la altitud de la ubicación de interés,  $T_0$  la temperatura estándar del nivel del mar,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $M_a$  la masa molar del aire seco y  $R$  la constante de gas universal.

El gradiente térmico es la tasa a la que una variable atmosférica, normalmente la temperatura en la atmósfera terrestre, cae con la altitud. El gradiente térmico surge de la palabra gradiente, en el sentido de una caída gradual. Para el ISA, se supone que la velocidad de caída cerca del suelo es de  $-6.5$  °C /1000 m. El signo negativo indica una disminución de la temperatura con la altitud Quick (2004).

Los contrastes de temperatura ( $T - T_s$ ) y humedad ( $e - e_s$ ) entre la superficie, indicados por el subíndice "s", y el aire suprayacente, deciden si estos flujos transfieren energía a la superficie del glaciar, lo que ocurre cuando ( $T - T_s$ ) o ( $e - e_s$ ) son positivos, o están alejados de la superficie del glaciar. El método de coeficientes de transferencia asume la igualdad de las tres corrientes turbulentas, la saturación del aire en la superficie del hielo derretido y la temperatura del aire

Tabla 6.1: Parámetros relevantes para los flujos de calor sensible y latente.

Parametros	Símbolo	Valor	Unidades
Densidad del aire a presión estándar	$\rho_a^\circ$	1.29	$\text{kg m}^{-3}$
Capacidad calorífica específica	$c_a$	1010	$\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$
Presión estándar	$P_0$	$10.13 \times 10^4$	$P_a$
Tasa de lapso de temperatura para ISA	L	6.50	$^\circ\text{K por } 1000 \text{ m}$
Altitud de AWS	H	5050	m s.n.m.
Temperatura estándar a nivel del mar	$T_0$	288.15	$^\circ\text{K}$
Aceleración de la gravedad	g	9.81	$\text{m s}^{-2}$
Masa molar de aire seco	$M_a$	$2.90 \times 10^{-2}$	$\text{kg mol}^{-1}$
Constante Universal de gas	R	8.31	$\text{J mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$
Presión atmosférica	P	$5.37 \times 10^4$	$P_a$
Calor latente de evaporación	$L_v$	$2.50 \times 10^6$	$\text{J kg}^{-1}$
Calor latente de sublimación	$L_s$	$2.83 \times 10^6$	$\text{J kg}^{-1}$
Coefficiente de intercambio por calor	$C_H$	$2.90 \times 10^{-3}$	
Coefficiente de cambio para presión de vapor	$C_H$	$2.90 \times 10^{-3}$	
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$	$\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4}$
La densidad del agua	$\rho_w$	1000	$\text{kg m}^{-3}$
Calor latente de fusión	$L_f$	$3.34 \times 10^5$	$\text{J kg}^{-1}$

 Fuente: [Fuchs \(2013\)](#)

adyacente a la superficie del glaciar que es igual a la temperatura del hielo o la nieve, por lo tanto  $e_s = 611 \text{ Pa}$ , y:

$$T_s = \left( \frac{E_s^\uparrow}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (6.23)$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann.

Finalmente, para convertir la humedad relativa ( $RH$ ) en presión de vapor, fueron usados las siguientes expresiones simples:

$$e = RH * e_{sat} \quad (6.24)$$

$$e_{sat} = 3.69 \times 10^{12} * \exp\left(\frac{-6150}{T}\right) \quad (6.25)$$

Donde  $T$  es la temperatura del aire en  $^\circ\text{K}$  y  $e_{sat}$  es la presión de vapor de la atmósfera suprayacente sobre el hielo en Pa. La Tabla [6.1](#) resume los parámetros utilizados en el glaciar Zongo para calcular los flujos turbulentos.

La Tabla [6.2](#) y la Figura [6.7](#) muestran los flujos de energía promedio durante un período de seis meses con datos completos observados; tres componentes aportan energía al glaciar: radiación neta de onda corta, radiación descendente de onda larga y calor sensible, mientras que la radiación de

Tabla 6.2: Medias mensuales de los flujos de energía. Todos los valores están en  $W m^{-2}$ . El período de cálculo se extiende desde marzo de 2005 hasta mayo de 2006 en la estación meteorológica Zongo. Los valores medios y las desviaciones estándar (Std. Dev.) De cada flujo durante el período también se muestran en las últimas dos filas.

Meses	$E_L^\downarrow$	$E_S^\downarrow$	$E_S$	$E_H$	$E_N$	$E_L^\uparrow$	$E_S^\uparrow$	$E_L$	$E_E$
Marzo	254.0	223.8	122.2	15.2	75.7	-306.3	-101.6	-52.3	-9.4
Abril	242.2	187.8	125.3	19.8	61.4	-304.9	-62.6	-62.7	-21.0
Agosto	186.3	260.8	153.4	29.2	23.4	-292.4	-107.4	-106.1	-5.2
Septiembre	248.7	207.2	80.3	12.1	11.6	-299.1	-126.9	-50.4	-30.4
Diciembre	275.2	234.5	122.1	8.7	86.8	-310.1	-122.4	34.9	-9.1
Mayo	189.6	234.3	125.7	30.2	-14.2	-294.2	-108.6	-104.6	-65.5
Media	232.7	224.7	121.5	19.2	40.8	-301.2	-103.2	-68.5	-31.4
Std. Dev.	36.4	25.1	23.4	8.9	39.8	7.1	21.7	29.9	23.4

Fuente: Fuchs (2013)

onda larga emitida por la superficie del glaciar, la radiación de onda corta reflejada y el calor latente representan sumideros que devuelven energía al entorno del glaciar.

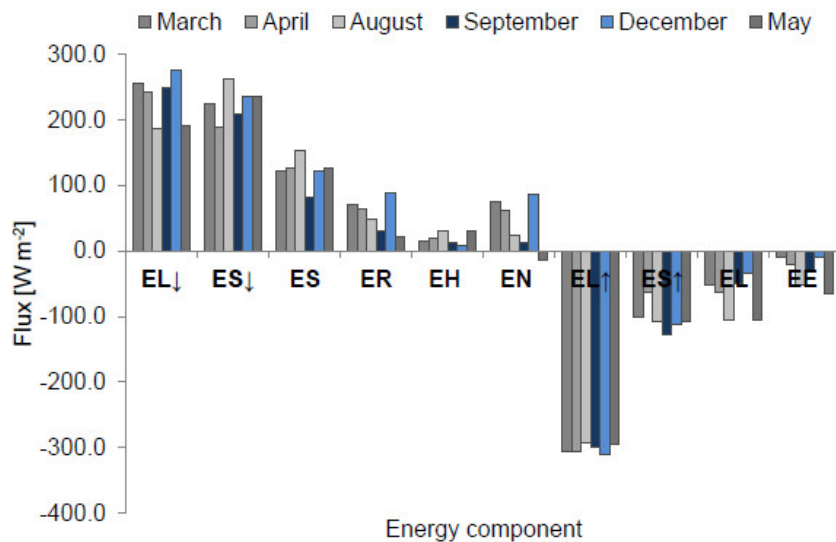


Figura 6.7: Factores impulsores y de respuesta en el balance energético de la superficie del glaciar.  $E_S$  y  $E_L$  representan las radiaciones netas de onda corta y de onda larga,  $E_R$  es la radiación neta, y  $E_N$  representa el flujo neto. Los colores azules representan flujos durante la estación húmeda (septiembre de 2005 y diciembre de 2005, estación meteorológica Zongo). Fuente: Fuchs (2013)

ETI + A incorpora radiación neta explícitamente en la estructura del modelo; el calor sensible y los efectos de la radiación entrante se transfieren a la superficie a través de la temperatura del

aire. La radiación de onda larga entrante  $E_L^\downarrow$  es la mayor fuente de energía (ver Tabla 6.2) y está muy influenciada por la temperatura, porque la porción importante de  $E_L^\downarrow$  proviene de la capa atmosférica cerca del suelo, cuya temperatura y concentración de vapor de agua están influenciadas por la temperatura. Sin embargo, durante la estación húmeda,  $E_L^\downarrow$  está controlado por las condiciones de las nubes y la temperatura y los perfiles de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera superior; estos no están directamente determinados por la temperatura (Sicart et al., 2005). Los sumideros de energía se consideran en ETI + A a través de diferentes mecanismos: la radiación de onda corta reflejada se tiene en cuenta a través del albedo,  $E_L^\uparrow$  es indicativo de la temperatura superficial  $T_S$  (véase la ecuación 6.23) y, por lo tanto, está vinculado a la temperatura umbral, y se considera el calor latente  $E_E$  como sublimación. En la estación seca, la mayor parte de la energía suministrada por la radiación y el calor sensible se consume por sublimación, dejando poca energía para el derretimiento (Cuffey and Paterson, 2010). La fusión se produce si hay un excedente de energía después de que se haya producido la sublimación. Este proceso se modela utilizando el umbral de temperatura como se mostrará más adelante.

La radiación solar entrante  $E_S^\downarrow$  y la radiación de onda larga descendente  $E_L^\downarrow$  muestran variaciones estacionales que dependen principalmente de la cubierta de nubes y la concentración de vapor atmosférico y gases de efecto invernadero; la radiación solar varía en unos pocos años debido a la excentricidad de la órbita elíptica de la Tierra (Cuffey and Paterson, 2010). Por ejemplo, el  $E_S^\downarrow$  fue mayor en agosto cuando las condiciones de cielo despejado persistieron mientras que  $E_L^\downarrow$  alcanzó su mínimo anual. Por otro lado, en la estación húmeda (Diciembre), el  $E_S^\downarrow$  disminuyó y el  $E_L^\downarrow$  aumentó debido a la capa de nubes estacionales. Las variaciones en la radiación de onda corta reflejada se controlaron mediante precipitación y tipo de superficie a través del efecto albedo. La radiación de onda larga emitida fue constante durante el año, oscilando entre  $-292.4$  a  $-310.1 \text{ W m}^{-2}$ ; sin embargo, estos flujos representaron temperaturas superficiales de  $-5.2$  y  $-1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. Los flujos turbulentos fueron pequeños y las ganancias en calor sensible fueron canceladas principalmente por el sumidero de energía en calor latente (Sicart et al., 2008). Sicart et al., (2008, 2011) presentaron una discusión más detallada sobre el presupuesto energético de los glaciares tropicales.

### Factor de radiación de onda corta.

En un modelo matemático conceptual con base física, el flujo de energía neta en la superficie impulsa la fusión a una velocidad  $M$ , dada como w.e. por unidad de tiempo, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\rho_W L_f M (1 - f_r) + \int_0^{\Delta z} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dz = E_N \quad (6.26)$$

$M$  es positivo para derretir y negativo para volver a congelar. En primer término,  $\rho_W$  es la densidad del agua y  $L_f$  el calor latente de fusión del hielo. El parámetro  $f_r$  indica la fracción de fusión que se vuelve a congelar dentro de la capa; varía de cero a uno. El segundo término representa la tasa de ganancia de calor sensible en una columna vertical de unidad de área a través de la capa, con  $\rho$  la densidad,  $c$  la capacidad calorífica específica,  $T$  la temperatura y  $t$  tiempo.

Si las temperaturas han alcanzado el punto de fusión en toda la capa, entonces el segundo término y  $f_r$  son iguales a cero, y la tasa de ablación se calcula como:

$$M = \frac{1}{\rho_w L_f} * E_N = m_N * E_N \quad (6.27)$$

Donde  $m_M$  ( $\text{cm } m^2 \text{ W}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) es la conversión de energía a profundidad de agua.

Suponiendo condiciones de fusión y utilizando los valores enumerados en la Tabla 6.1 para  $\rho_w$  y  $L_f$ , la Ecuación 6.26 se puede escribir como:

$$M = 2.99 \times 10^{-6} * E_N (\text{ms}^{-1}) \quad (6.28)$$

La conversión de  $\text{m } s^{-1}$  a  $\text{cm } \text{dia}^{-1}$  se produce la expresión final:

$$M = 0.026 * E_N (\text{cmdia}^{-1}) \quad (6.29)$$

En la ecuación 6.27 muestra que  $m_N$  permanece constante independientemente de la magnitud de los componentes del balance de energía y que el mismo factor se multiplica a cada uno de los flujos; por lo tanto, SRF es igual a  $0.026 \text{ cm } m^2 \text{ W}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  para el glaciar Zongo (Fuchs, 2013).

### Factor de Temperatura.

Siguiendo el enfoque propuesto por Brubaker et al. (1996), el factor de temperatura se deriva usando una aproximación a la ecuación del balance de energía. Primero, de la Ecuación 6.27:

$$M = m_N * E_N = m_N * E_S + m_N * E_L + m_N * E_H + m_N * E_H \quad (6.30)$$

Los flujos turbulentos se calculan utilizando las ecuaciones 6.18 y 6.19, de las cuales se obtiene la siguiente expresión:

$$M = m_N * E_S + m_N * E_L + m_N * [0.0129 C_H P_u (T - T_s) + 22.2 C_E u (e - e_s)] \quad (6.31)$$

Durante la fase de fusión, el aire en la superficie está saturado y las temperaturas alcanzan los  $0^\circ\text{C}$ , entonces:

$$M = m_N * E_S + m_N * E_L + m_N * \left\{ 0.0129 C_H P_u T + \left[ 22.2 C_E u * RH * 3.69 \times 10^{12} * \exp\left(\frac{-6150}{T}\right) - 611 \right] \right\} * T \quad (6.32)$$

$$M = m_N * E_S + m_N * E_L + m_N * \left\{ 0.0129 C_H P_u + \left[ 22.2 C_E \frac{u}{T} * RH * 3.69 \times 10^{12} * \exp\left(\frac{-6150}{T}\right) - 611 \right] \right\} * T \quad (6.33)$$

El término entre paréntesis en la Ecuación 6.32 se divide y multiplica por T para producir la Ecuación 6.33, esto es posible si se supone que el calor latente depende de la temperatura. De manera similar, la radiación neta de onda larga se introduce en el término delimitado por las llaves para separar los componentes dependientes de la temperatura y los independientes de la temperatura:

$$M = m_N * E_S + m_N * \left\{ \frac{E_L}{T} + 0.0129 C_H P_u + \left[ 22.2 C_E \frac{u}{T} * RH * 3.69 \times 10^{12} * \exp\left(\frac{-6150}{T}\right) - 611 \right] \right\} * T \quad (6.34)$$

que es equivalente a la ecuación 7.2 y proporciona la expresión matemática para calcular el factor de temperatura a partir de información meteorológica:

$$TF = m_N * \left\{ \frac{E_L}{T} + 0.0129 \frac{k_0^2}{\ln(z/z_0) \ln(z/z_{0T})} P_u + \left[ 22.2 \frac{k_0^2 * u * RH * 3.69 \times 10^{12}}{T * \ln(z/z_0) \ln(z/z_{0E})} * \exp\left(\frac{-6150}{T}\right) - 611 \right] \right\} \quad (6.35)$$

Los factores de temperatura mensuales se estimaron utilizando constantes físicas (Tabla 6.1) y datos meteorológicos (Tabla 6.2). Los resultados se muestran en la Tabla 6.3. Aunque la diferencia entre los valores extremos no es alta, es posible identificar una variación estacional de  $TF$  que está altamente correlacionada con la velocidad del viento ( $r = 0.97$ ). El calor sensible contribuye más del 90% al valor final de  $TF$  y varía proporcionalmente con la velocidad del viento. La radiación neta de onda larga y el calor latente contribuyen juntos al 10% restante de  $TF$ .

Con vistas a las aplicaciones en regiones con escasez de datos y para estudios de cambio climático en los Andes tropicales, un  $TF$  estacional constante de  $0.12 \text{ cm } ^\circ K^{-1} \text{ dia}^{-1}$  parece ser razonable según este análisis.

Las dos últimas secciones sugieren que  $SRF$  y  $TF$  toman valores bastante constantes independientemente de la época del año. En consecuencia, se puede suponer que las variaciones estacionales de las tasas de fusión están determinados por el forzamiento meteorológico siempre que la temperatura esté por encima del valor umbral (Fuchs, 2013). La siguiente sección muestra la base para determinar este parámetro.

### Temperatura umbral.

Esta sección se basa en el trabajo de (Kuhn, 1987) sobre los glaciares Alpinos. Se sigue un enfoque similar para evaluar las condiciones meteorológicas para la fusión en los glaciares tropicales.

El hecho de que la fusión se produce cuando las temperaturas de la superficie alcanzan los  $0^\circ C$  a menudo ha llevado a la suposición simplificada de que también se derrite a temperaturas del aire de  $0^\circ C$ . Esta declaración no toma en cuenta las complejidades del equilibrio energético de la superficie en la que la radiación y los flujos de calor turbulentos operan independientemente de la temperatura del aire. La ecuación del balance de energía se utiliza para obtener información sobre las condiciones prevalecientes durante la fusión (Fuchs, 2013). Los flujos que no dependen de la temperatura se separan y se toman como una variable independiente:

$$E_A = E_S^\downarrow + E_S^\uparrow + E_L^\downarrow \quad (6.36)$$

Donde  $E_A$  es la radiación absorbida por la superficie. En este caso,  $E_L^\uparrow$  no está incluido debido a su dependencia en  $T_S$ . Por lo tanto, el balance de energía se puede escribir como:

Tabla 6.3: Datos meteorológicos mensuales y estimación de factores de temperatura mensual en la estación meteorológica Zongo.

Meses	$E_L$ ( $Wm^{-2}$ )	$T^{\circ}C$	$u$ ( $m s^{-1}$ )	RH (%)	TF ( $cm^{\circ}C^{-1} dia^{-1}$ )
Marzo	-52.3	2.0	1.9	72.3	0.09
Abril	-62.7	1.5	2.6	67.4	0.13
Agosto	-106.1	0.1	2.8	44.5	0.13
Septiembre	-50.4	-1.3	2.6	73.3	0.13
Diciembre	-34.9	1.1	1.9	78.2	0.09
Mayo	-104.6	0.5	2.9	33.1	0.13

Fuente: Fuchs (2013)

$$E_N = E_A + E_L^{\uparrow} + E_H + E_E = E_A - \sigma T_S^4 - 0.0129 C_H P_u (T_S - T) - 22.2 C_E u (e_s - e) \quad (6.37)$$

Al comienzo o cese de la fusión,  $E_N$  y  $T_S$  son iguales a cero,  $E_L^{\uparrow} = -315 Wm^{-2}$  y  $e_s = 611 Pa$ ; considerando los parámetros para los flujos turbulentos que se muestran en la Tabla 6.1, y una velocidad de viento constante de  $1.9 m s^{-1}$  (Tabla 6.3):

$$\begin{aligned} 0 &= E_A - 315.6 + 0.0129 C_H P_u T - 22.2 C_E u (611 - e) \\ &= E_A - 315.6 + 3.8T - 74.7 + 0.12e \\ &= E_A + 3.8T + 0.12e - 390.3 \\ T &= 102.7 - \frac{E_A}{3.8} - 0.03e \end{aligned} \quad (6.38)$$

Esta ecuación implica que, para valores dados de  $E_A$  y  $e$ , existe un solo valor de  $T$  que satisface la condición de fusión incipiente. Además, la sensibilidad de cada variable se puede determinar tomando derivadas parciales en la ecuación 6.38:

$$\frac{\partial T}{\partial e} = -0.03 \quad ^{\circ}CPa^{-1} \quad (6.39)$$

$$\frac{\partial T}{\partial E_A} = -0.26 \quad ^{\circ}C(Wm^{-2})^{-1} \quad (6.40)$$

$$\frac{\partial E_A}{\partial e} = -0.12 \quad Wm^{-2}Pa^{-1} \quad (6.41)$$

La primera expresión indica que una disminución en la humedad debe ser contrarrestada por un aumento en la temperatura del aire, es decir, una sublimación más fuerte se compensa con un flujo aumentado de calor sensible hacia la superficie. Esto tiene implicaciones importantes para la fusión en la estación seca, cuando la baja humedad favorece la sublimación, y el deshielo comienza cuando la superficie se ha calentado hasta el punto de fusión debido a las temperaturas mejoradas que indican las contribuciones de la radiación de onda larga y el calor sensible. Del mismo modo, una disminución en la radiación absorbida necesita ser compensada por un aumento de la temperatura



del aire; Este efecto es importante cuando la  $E_A$  se ve afectada por el sombreado topográfico debido al relieve y orientación, la capa de nubes o factores similares que reducen la radiación absorbida. En estos casos, la temperatura umbral toma valores más altos en compensación. Finalmente, una disminución en la densidad del vapor atmosférico requiere un aumento en la radiación absorbida para la compensación.

Estas ecuaciones son ilustrativas y explican cualitativamente las condiciones meteorológicas para la fusión y las interacciones en la superficie del glaciar. Sin embargo, no pueden usarse para calcular el valor exacto de la temperatura umbral dados los valores de las otras variables debido a grandes incertidumbres en la estimación de los flujos turbulentos, que afectan los coeficientes de sensibilidad; este análisis está más allá del alcance de este estudio. En cambio, la temperatura umbral se encuentra por optimización (Fuchs, 2013).

## 6.4. Modelado de radiación solar.

Determinar con precisión la posición del sol es esencial para calcular adecuadamente la cantidad de radiación solar entrante. Esto también es necesario cuando se consideran los efectos topográficos. Suponiendo un plano horizontal, la posición solar se describe mediante una combinación de los ángulos cenital ( $Z$ ) y azimutal, que se calculan utilizando métodos estándar (Iqbal, 1983). Modelamos la potencial radiación solar directa ( $I_a$ ) de cielo despejado, se calcula como una función de la parte superior de la radiación solar de la atmósfera:

$$I_a = I_0 \left( \frac{R_m}{R} \right)^2 \psi_a \frac{P}{P_0 \cos z} \quad (6.42)$$

Donde  $I_0$  es la constante solar ( $\sim 1368 W m^{-2}$ ),  $R$  es la distancia sol-tierra (el subíndice  $m$  se refiere a la media),  $\psi_a$  es la transmisividad de la atmósfera a cielo despejado (se utiliza una constante de 0.75; (Hock, 1999)),  $P$  es la presión atmosférica calculada usando un gradiente térmico simple para el aire seco,  $P_0$  es la presión atmosférica media al nivel del mar, y  $Z$  es el ángulo cenital local (que explica el tamaño de la masa de aire por la que la radiación debe viajar antes de llegar a la superficie).

La ecuación (6.42) ha sido modificada de (Hock, 1999) para excluir el componente responsable de la atenuación en la superficie. Este término se agregará más adelante en el modelo topográfico.

### 6.4.1. Vector que define una superficie inclinada.

Consideramos la unidad de superficie más pequeña en un DEM regularmente cuadrículado como el plano encerrado por cuatro puntos de datos:  $z_{i,j}$ ,  $z_{i+1,j}$ ,  $z_{i,j+1}$ ,  $z_{i+1,j+1}$ , donde  $z_{i,j}$  es la elevación de un punto en la fila  $i$ , columna  $j$  (ver figura 6.8). Se prefiere el uso de la celda como la unidad de área de superficie para la compatibilidad con otras aplicaciones, como la información ráster extraída de fotografías orto-rectificadas o imágenes satelitales, y para la compatibilidad con modelos existentes en glaciología, hidrología o estudios de nieve, que están basadas en celdas (Arnold et al., 1996). Tampoco es confiable interpolar valores desde el interior de una celda en áreas de montaña, caracterizados por un cambio no uniforme. Sin embargo, como un plano se define por tres puntos en el espacio, los cuatro puntos en las esquinas de la celda de la cuadrícula pueden delimitar más de un punto plano (Corripio, 2003).

Como la resolución de los datos no permite definir la geometría del área encerrada, una buena aproximación es encontrar un promedio entre los dos triángulos a ambos lados de la diagonal de la celda. Se puede demostrar que el resultado es el mismo, cualquiera que sea la diagonal que elijamos.

Un vector normal a estas superficies se define por la mitad de la suma de productos cruzados de vectores a lo largo de los lados de la celda de la cuadrícula, definida como en la ecuación (6.43). En la figura 6.8, estas superficies triangulares están comprendidas entre los vectores  $ab$  y  $cd$ . El gradiente será el promedio de los productos cruzados  $a \times b$  y  $c \times d$ .

El vector resultante de un producto cruzado que tiene la longitud del paralelogramo cuyos lados son los factores del vector. Por lo tanto, el módulo del vector normal a la superficie calculada de esta manera se aproximará al valor del área de la superficie de la celda de la cuadrícula con una precisión proporcional a la resolución de la cuadrícula (Corripio, 2003).

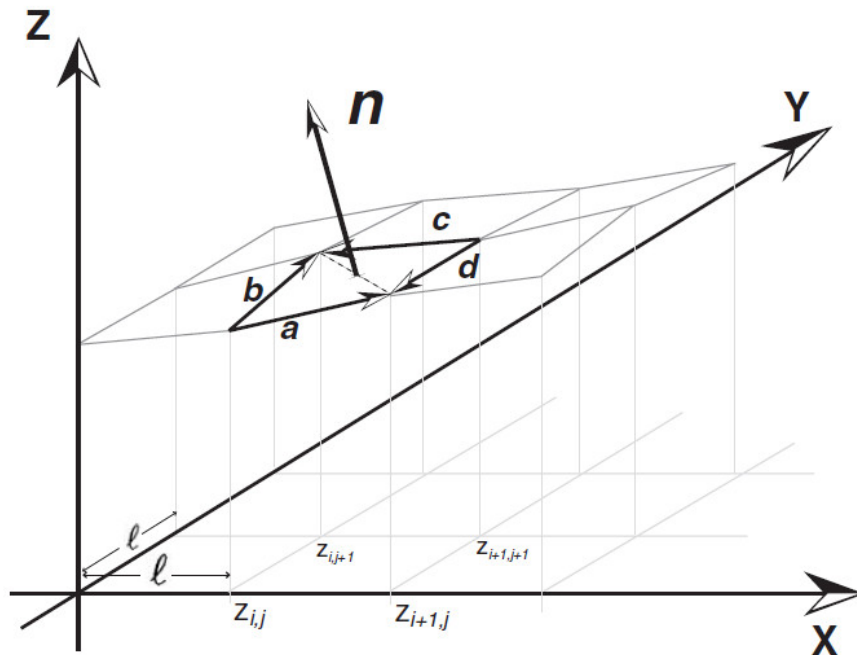


Figura 6.8: Vector normal a una superficie de celda de cuadrícula. El vector  $n$  es el promedio de productos cruzados  $a \times b$  y  $c \times d$ . Su longitud se aproxima al área de la superficie de la celda de la cuadrícula con precisión dependiendo de la resolución. Fuente: Corripio (2003)

En una cuadrícula regular de tamaño de la celda  $l$ , como en la figura 6.8, los componentes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  de los vectores a lo largo del lado de la celda de la cuadrícula se definen como:

$$\begin{cases} a = (l, 0, \Delta z_a), & \text{with } \Delta z_a = z_{i+1,j} - z_{i,j} \\ b = (0, l, \Delta z_b), & \text{with } \Delta z_b = z_{i,j+1} - z_{i,j+1} \\ c = (-l, 0, \Delta z_c), & \text{with } \Delta z_c = z_{i,j+1} + z_{i+1,j+1} \\ d = (0, -l, \Delta z_d), & \text{with } \Delta z_d = z_{i+1,j} - z_{i+1,j+1} \end{cases} \quad (6.43)$$

El vector normal a la celda cuadrícula,  $n$  será:

$$n = \frac{(a \times b)}{2} + \frac{(c \times d)}{2} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ l & 0 & \Delta z_a \\ 0 & l & \Delta z_b \end{vmatrix} + \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ -l & 0 & \Delta z_c \\ 0 & -l & \Delta z_d \end{vmatrix} \quad (6.44)$$

Simplificar el resultado de la ecuación (6.44) da los componentes del vector normal a la superficie en términos de puntos de elevación de la cuadrícula y espacio de celdas como:

$$n = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(z_{i,j} - z_{i+1,j} + z_{i,j+1} - z_{i+1,j+1}) \\ \frac{1}{2}(z_{i,j} + z_{i+1,j} - z_{i,j+1} - z_{i+1,j+1}) \\ l^2 \end{pmatrix} \quad (6.45)$$

El área de superficie de estas celdas será  $|n|$ , la longitud del vector  $n$ . El vector unitario en la dirección de  $n$  será denotado por  $n_u$ . Este algoritmo hace un uso óptimo de las capacidades de manejo de muchos lenguajes de programación y puede implementarse de manera muy eficiente. El tiempo de CPU utilizado para procesar un DEM de aproximadamente 250 000 celdas, implementando el algoritmo en IDL<sup>1</sup>, en una estación de trabajo Sun Enterprise 450 fue de aproximadamente 0.5 segundos, excluyendo la entrada de datos, y otro medio segundo para el cálculo de los vectores unitarios correspondientes y el área de cada celda (Corripio, 2003).

Si es necesario utilizar la pendiente y el aspecto de la superficie, éstos pueden calcularse a partir de los componentes de  $n_u$  de la siguiente manera:

$$\zeta = \cos^{-1} n_{uz}, \quad (6.46)$$

Donde  $\zeta$  es la pendiente y  $n_{uz}$  es la coordenada del vector  $n_u$ .

El aspecto  $\phi$  no está definido para pendientes de  $0^\circ$ , un gradiente de vector vertical. En cualquier otro caso, se puede calcular a partir de los componentes x, y de  $n_u$ . Para hacer que el vector de gradiente sea compatible con el vector del Sol, se ha elegido un sistema de coordenadas zurdo, con el eje X (columnas) aumentando hacia el este y el eje Y (filas) aumentando hacia el sur. Contando en sentido horario desde el norte, el aspecto sería:

$$\phi = \frac{\Pi}{2} + \tan^{-1} \frac{n_{uy}}{n_{ux}}, \quad (6.47)$$

El signo de las coordenadas debe tenerse en cuenta para decidir en qué cuadrante se encuentra el vector. La tangente no se define cuando la proyección horizontal de  $n_u$  se encuentra en el eje Y ( $n_{ux} = 0$ ) y es ambigua cuando se encuentra en el eje X. Alternativamente, se podría usar una relación entre el seno y el coseno de  $n_{uxy}$  (Horn, 1981). El sistema de coordenadas anterior es una imagen especular de los comúnmente utilizados en los DEM, con el eje Y aumentando hacia el norte. Para aplicar la ecuación (6.47) en este caso sólo necesitamos invertir la coordenada y del vector  $n_u$ .

### 6.4.2. Vector que define la posición del sol.

El vector en la dirección del Sol se puede calcular a partir de los ángulos de azimut solar y cenital (Horn, 1981) Estos ángulos se pueden calcular utilizando la trigonometría esférica (Office

<sup>1</sup>IDL (Interactive Data Language) es el lenguaje de programación estructurado de gran alcance que ofrece un procesamiento de imágenes integrado. <https://www.geospace-solutions.com/idl>

and Office (1974), Iqbal (1983)). Sin embargo, para completar y ser coherente con el enfoque vectorial, se explica un nuevo procedimiento. Definimos un sistema de coordenada topocéntrica como un sistema de referencia ortogonal con origen en la posición del observador en la superficie de la Tierra (Figura 6.9). Para seguir las convenciones normalmente utilizadas en los estudios de radiación solar con respecto a la posición del Sol (Iqbal (1983, p. 15)), los ejes de coordenadas se definen de la siguiente manera:

- El eje X es tangencial a la superficie de la Tierra en dirección Este-Oeste y positivo hacia el este.
- El eje Y es tangencial en dirección Norte-Sur y positivo hacia el sur.
- El eje Z se encuentra a lo largo del radio de la Tierra y es positivo hacia arriba.

Por definición, el Sol se encuentra en el plano ZY (es decir, está en el plano vertical) en mediodía hora local aparente (LAT). En este momento, la coordenada x de un vector unitario que apunta al Sol (vector solar de ahora en adelante) será nula. La declinación solar ( $\delta$ ) es el ángulo entre los rayos solares y el plano del ecuador de la Tierra. La latitud geográfica ( $\varphi$ ) es el ángulo entre el radio de la Tierra en la posición del observador (que es el eje Z en nuestro sistema de coordenadas) y el plano ecuatorial. Por lo tanto, el vector solar,  $S_0$ , al mediodía LAT será:

$$S_0 = (0, \sin(\varphi - \delta), \cos(\varphi - \delta)) \quad (6.48)$$

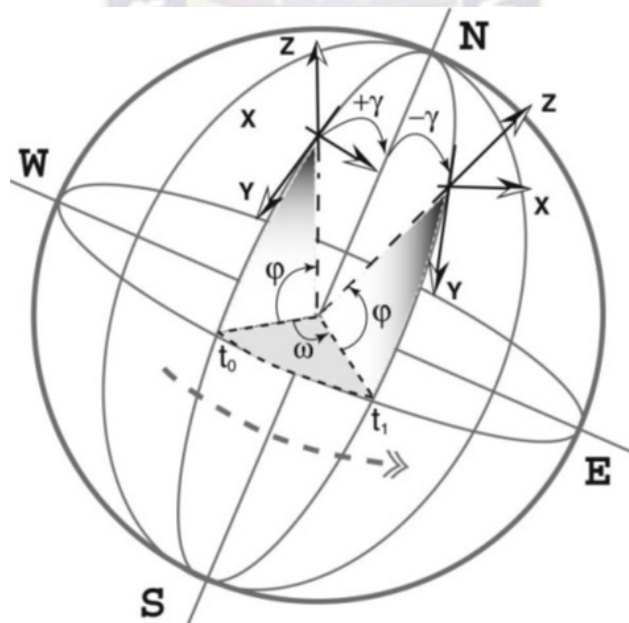


Figura 6.9: Rotación del sistema de coordenadas topocéntricas XYZ en el ángulo  $\omega$ , desde el tiempo  $t_0$  hasta el tiempo  $t_1$ . Este movimiento se puede descomponer en tres rotaciones: (i) rotación alrededor eje X en ángulo  $\gamma = \pi/2 - \varphi$ , donde  $\varphi$  es la latitud; (ii) rotación alrededor del eje Z en el ángulo  $\omega$ ; y (iii) rotación hacia atrás alrededor del eje X en ángulo  $-\gamma$ . La traslación se ignora ya que el paralaje máximo de la Tierra es de 8.8 segundos de arco (Office and Office, 1974), y por lo tanto insignificante para la mayoría de las aplicaciones de radiación solar. Fuente: Corripio (2003)

En cualquier momento  $t$ , la Tierra se habrá alejado del mediodía en un ángulo horario  $\omega$  a una velocidad angular de  $2\pi$  radianes o  $360^\circ$  por día. El ángulo horario es el ángulo entre el meridiano del observador y el meridiano solar, la convención es que  $\omega$  es cero al mediodía y positivo antes del mediodía (Iqbal (1983, p. 15)). En este momento el sistema de coordenadas topocéntrico habrá cambiado de posición en relación con el Sol al mediodía. Este movimiento puede descomponerse en tres rotaciones (ver Figura 6.9): una alrededor del eje X, para colocar el eje Z paralelo al eje de rotación de la Tierra; una segunda rotación alrededor del eje Z en el ángulo  $\omega$  y una tercera rotación de vuelta alrededor del eje X a la posición del observador. Para encontrar las coordenadas del vector solar en el nuevo sistema de referencia girado, multiplicamos las coordenadas originales por tres matrices rotacionales que describen estos movimientos. Para una breve descripción de las matrices rotacionales, un procedimiento común en gráficos por computadora, ver por ejemplo Foley et al. (1996) y referencias relacionadas (Corripio, 2003). Por lo tanto, en cualquier momento, y suponiendo que no haya refracción atmosférica, el vector solar será:

$$S = r_x(\gamma)r_z(\omega)r_x(-\gamma)s_0 \quad (6.49)$$

Donde  $r$  es una matriz de rotación alrededor del eje en subíndice y ángulo entre paréntesis,  $\gamma$  es el ángulo entre el eje de la tierra y el eje Z del sistema de coordenadas topocéntricas, y el ángulo horario  $\omega$  es cero al mediodía y tiene el siguiente valor en radianes en cualquier momento  $t$  (LAT) dado en horas y fracción decimal:

$$\omega = \pi\left(\frac{t}{12} - 1\right) \quad (6.50)$$

En notación de matriz:

$$s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\omega & -\sin\omega & 0 \\ \sin\omega & \cos\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\gamma) & -\sin(-\gamma) \\ 0 & \sin(-\gamma) & \cos(-\gamma) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_{0x} \\ s_{0y} \\ s_{0z} \end{pmatrix} \quad (6.51)$$

Esta rotación de la Tierra también implica una traslación del sistema de referencia definido,  $s_0$ , pero el paralaje máximo de la Tierra es  $8.8''$  de arco (Office and Office, 1974), eso es  $4.4''$  si tomamos como referencia al mediodía para el ángulo horario. Esto es mucho más pequeño que la precisión de otras cantidades involucradas, por lo que el esfuerzo computacional adicional para explicar esta traducción se puede guardar para la mayoría de las aplicaciones. Esta ecuación se puede alimentar directamente a la mayoría de los lenguajes de programación, simplificando el esfuerzo de programación, o se puede resolver para cada coordenada. En este caso, los valores para las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  del vector solar serían:

$$s = \begin{pmatrix} -\sin\omega\cos\delta \\ \sin\phi\cos\omega\cos\delta - \cos\phi\sin\delta \\ \cos\phi\cos\omega\cos\delta + \sin\phi\sin\delta \end{pmatrix} \quad (6.52)$$

De esta ecuación, el ángulo zenit solar  $\theta$  puede ser calculado como:

$$\theta = \cos^{-1}s_z \quad (6.53)$$

Y el azimut solar  $\phi$  como:

$$\phi = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{s_y}{s_x} \quad (6.54)$$

Donde  $s_x$ ,  $s_y$  y  $s_z$  son las coordenadas del vector solar.

Debido a la oblicuidad de la eclíptica, la declinación puede cambiar de  $-23^\circ 26' 12''$  en el solsticio de invierno (hemisferio norte) a  $+23^\circ 26' 12''$  en el solsticio de verano, con una variación de menos de  $10''$  en los próximos 20 años debido a la precisión y nutación en la oblicuidad de la eclíptica y a la precisión general de la longitud del Sol (Office and Office, 1974). Calcular la declinación no es un problema trivial, ya que su valor se ve afectado por los cambios orbitales a largo plazo (es decir, en las escalas de tiempo de Milankovitch) y por la interacción con la Luna y otros planetas.

Muchos autores han dado diferentes soluciones al problema de encontrar la declinación solar con diferentes grados de precisión (Spencer (1971), Walraven (1977), Page (1986)). Aquí se utiliza una aproximación de la serie de Fourier derivada por Bourges (1985) que estima la declinación con un error medio de  $0.008^\circ$  y un error máximo de  $0.02^\circ$  son usados. Bourges explica claramente el procedimiento y los supuestos astronómicos, de modo que la serie se puede corregir para la época requerida. Para el día de hoy, nosotros tenemos:

$$\delta = 0.3723 + 23.2567 \sin D - 0.578 \cos D + 0.1149 \sin 2D + 0.3656 \cos 2D - 0.1712 \sin 3D \quad (6.55)$$

Donde D es el numero del día:

$$D = \left( \frac{360}{365.25} \right) \times (J - 79.346) \quad (6.56)$$

Y J es el día juliano, 1 el primero de enero y 365 el 31 de diciembre (más estrictamente, la diferencia entre el día juliano en consideración y el día juliano el primero de enero al mediodía para ese año, más 1). La variación diaria máxima en la declinación es menor que  $0.5^\circ$  de arco en los equinoccios y menos de 1 minuto de arco en los solsticios (Spencer, 1971), por lo tanto, cuando se requiere precisión al grado más cercano, se puede usar un solo valor de  $\delta$  durante todo un día, con una considerable simplificación en los cálculos. Para mantener un error similar al del método seleccionado para calcular la declinación, las coordenadas del vector del Sol al mediodía ( $s_0$ ) se pueden recalcular cada vez, agregando al número de día  $t/24$  días, donde t es el número de horas desde el mediodía LAT.

Para integrar la cantidad de radiación solar durante todo el día, es necesario conocer la duración de la luz del día y, por lo tanto, la hora del amanecer y el atardecer. El amanecer y el atardecer astronómicos ocurrirán en el momento en que la coordenada z del vector Sol sea igual a cero. Por lo tanto, resolviendo para z en la ecuación (6.52):

$$z = \cos \phi \cos \omega \cos \delta + \sin \phi \sin \delta = 0 \quad (6.57)$$

Da:

$$\begin{aligned} \cos \omega &= \frac{-\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \sin \delta} \\ \omega &= \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \end{aligned} \quad (6.58)$$

que es el valor absoluto del ángulo horario al amanecer o al atardecer. Tenga en cuenta que esta solución está de acuerdo con los resultados derivados de las ecuaciones trigonométricas esféricas (por ejemplo, Iqbal (1983, p 16)).

El amanecer será a las  $t = 12(1 - \omega/\pi)$  horas y la puesta de sol a  $t = 12(1 + \omega/\pi)$ . La duración del día será de  $2\omega\pi/24$ . La ecuación no tiene solución si  $|\tan\varphi\tan\delta| > 1$ , en este caso, si la latitud tiene el mismo signo de declinación, es decir,  $\varphi/|\varphi| = \delta/|\delta|$  es el día polar, y si son de signo diferente, entonces es la noche polar. Estas ecuaciones no tienen en cuenta la altura del observador sobre el horizonte o la irradiación solar difusa crepuscular: para un tratamiento detallado de los parámetros astronómicos involucrados en este caso, consulte la Oficina de Almanaque Náutico (1974) (Corripio, 2003).

### 6.4.3. Ángulo de incidencia del sol en superficies inclinadas.

La fracción de luz interceptada por la superficie inclinada será proporcional al coseno del ángulo entre la normal a la superficie y los rayos solares. Habiendo calculado un gradiente de vector unitario normal a la superficie y un vector unitario en la dirección del Sol, el producto escalar de ambos da el coseno del ángulo entre ellos; así, el ángulo entre el Sol y la normal a la superficie,  $\theta_s$  es:

$$\theta_s = \cos^{-1}(s * n_u) \quad (6.59)$$

La radiación solar entrante se modeló para cielos despejados a intervalos de 15 minutos desde el amanecer hasta el atardecer. La irradiación en cada celda de la cuadrícula se evalúa de acuerdo con el ángulo de incidencia del Sol y el sombreado del terreno circundante como se describe en §6.4.4. La radiación solar entrante difusa se evalúa de acuerdo con la porción hemisférica del cielo visible desde cada celda de la rejilla como se describe en §6.4.5.

### 6.4.4. Relieve sombreado.

El Sol puede considerarse como una fuente de luz puntual a una distancia infinita y, por lo tanto, todos los rayos de iluminación que llegan a una cuadrícula pueden considerarse paralelos. Por conveniencia computacional, consideramos un "plano de iluminación" perpendicular a los rayos solares (Figura 6.10). Todos los rayos solares atraviesan este plano en ángulo recto. Al verificar la proyección de una celda de cuadrícula sobre este plano, siguiendo la dirección del Sol, podemos determinar si un punto está en el Sol o en la sombra de otra celda. En la figura 6.10 esto se ilustra para un ejemplo bidimensional: la proyección de  $P_1$ , es decir,  $P'_1$ , tiene un valor más alto que cualquiera de las anteriores (ya que es el primer punto a escanear), por lo que está en el Sol. Sin embargo, de manera similar para  $P'_2$  y  $P'_3$ ,  $P'_4$  tiene un valor menor que  $P'_3$  y, por lo tanto, está a la sombra. La proyección de un punto  $P'_i$  en el plano solar SP es el producto escalar del vector  $OP_i$  y el vector unitario  $sp$ , que es un vector en la dirección del plano SP y perpendicular al vector solar  $s$ . Una celda se sombreadá si el ángulo entre el Sol y el vector normal a la superficie de la celda es mayor que  $\pi/2$  (Corripio, 2003).

Al escanear la cuadrícula a través de la ruta del Sol, podemos determinar qué celdas están sombreadas o no comparando sus valores de proyección. Para acelerar la implementación del algoritmo, se define una matriz de celdas para cada celda en el lado del Sol del borde de la cuadrícula. La longitud de esta matriz viene dada por la primera intersección de una línea a lo largo del vector opuesto al Sol y los límites del DEM. La posición x, y de las celdas consideradas en la cuadrícula

original se estima mediante incrementos enteros del vector opuesto al Sol para la coordenada  $x$ , y más grande (Corripio, 2003).

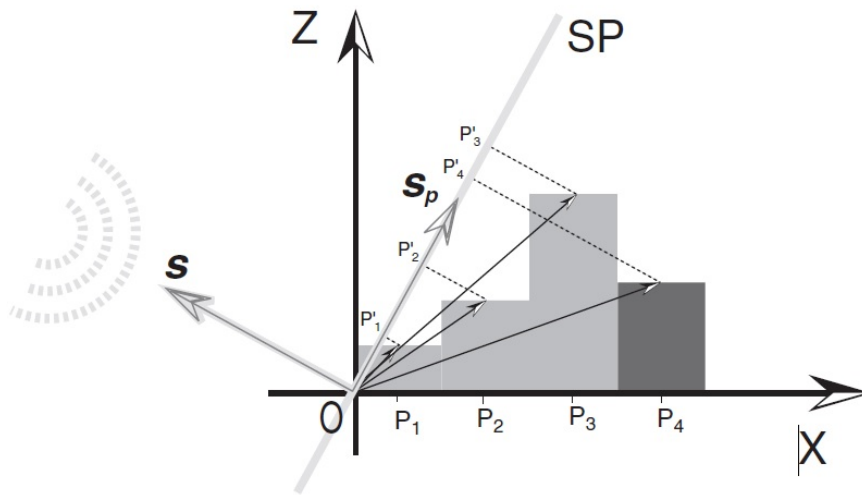


Figura 6.10: Sombreado. Como el Sol puede considerarse como una fuente puntual a una distancia infinita, todos los rayos solares son paralelos y cruzan el plano SP perpendicularmente. Al verificar la proyección de una celda de cuadrícula sobre este plano, podemos determinar si un punto está en el Sol o en la sombra de una celda anterior. En la figura, la proyección de  $P_1$ , es decir  $P'_1$ , tiene un valor más alto que cualquiera anterior (ya que es el primer punto a escanear), por lo que está en el Sol. De manera similar para  $P'_2$  y  $P'_3$ ,  $P'_4$  tiene un valor menor que  $P'_3$  y, por lo tanto, está a la sombra. La proyección de un punto  $P'_i$  en el “plano solar” SP es el producto escalar del vector  $OP_i$  y el vector  $s_p$ , que es un vector unitario perpendicular a  $s$ , el vector unitario en la dirección del Sol. Corripio (2003)

Se supone que el Sol está a  $315^\circ$  (noroeste) y el ángulo cenital es de  $45^\circ$ , siempre se debe ubicar al sol en el cuadrante noroeste del mapa en aplicaciones cartográficas (entre 270 y 360 grados). Esto es porque se espera ver sombras en las bases de los objetos. Si se colocara el sol donde realmente debe estar, la mayoría de las personas percibirían las montañas como valles cuando la iluminación se aplica desde el sur.

Las coordenadas de los vectores involucrados en estos cálculos para el caso tridimensional son las siguientes: el vector desde el origen a cualquier punto  $P_{i,j}$  en la columna  $i$ , fila  $j$  es:

$$P_{i,j} = (l_i, l_j, z_{i,j}) \quad (6.60)$$

Donde  $l$  es el tamaño de la celda y  $z_{i,j}$  la elevación de la celda en  $i,j$ . Para simplificar, suponemos que el plano solar cruza la cuadrícula en el origen  $(0, 0, 0)$ . El vector unitario en la dirección del plano solar se calcula como una combinación de dos productos cruzados:

$$s_p = s \times \frac{s \times s_{xy0}}{|s \times s_{xy0}|} \quad (6.61)$$

Donde el segundo término es el vector unitario perpendicular al Sol en dirección horizontal y  $s_{xy0}$  es el plano  $(XY)$ . La proyección  $P'_{i,j}$  de  $P_{i,j}$  es:



$$P'_{i,j} = P_{i,j} \cdot s_p \quad (6.62)$$

### 6.4.5. Factor de cielo visible (cielo despejado).

El factor de vista del cielo se define como la fracción hemisférica del cielo sin obstrucciones visible desde cualquier punto (Figura 6.11). Este es un parámetro importante para el cálculo de la radiación difusa entrante y para el equilibrio neto de la radiación de onda larga. El parámetro complementario, “factor de vista del suelo”, es importante en la evaluación de la radiación difusa y múltiple dispersa de onda corta, especialmente en áreas de albedo alto, como montañas cubiertas de nieve, así como para el balance de radiación de onda larga. También es importante en otros campos, como la datación cosmogénica, para evaluar el blindaje topográfico de la radiación cósmica (Dunne et al., 1999). Es una práctica común medir el ángulo cenital del horizonte en un intervalo de azimut dado y luego promediar todas las direcciones de la brújula para calcular la relación de hemisferio visible para todo el hemisferio (Corripio, 2003).

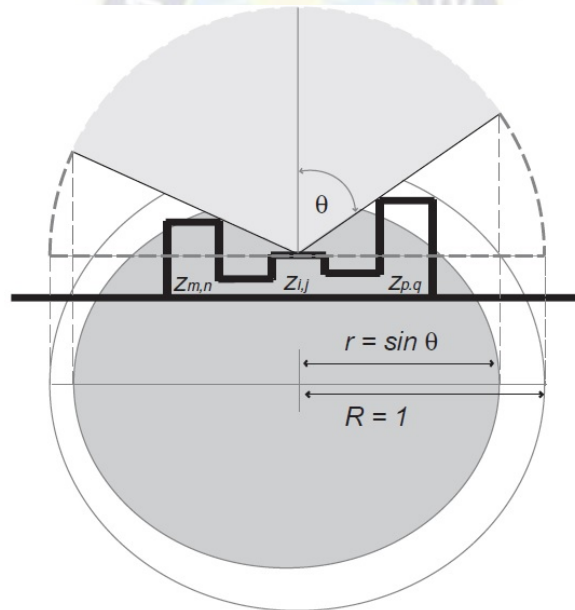


Figura 6.11: Factor de vista del cielo: la fracción de cielo visible desde cualquier punto se evalúa como la relación del área proyectada del hemisferio visible al área de la base de una esfera unitaria. La figura ilustra el cálculo para una celda dada  $z_{i,j}$  con visibilidad obstruida por las celdas vecinas  $z_{m,n}$  y  $z_{p,q}$ , donde la porción de cielo visible es el área sombreada en plomo claro. El factor de vista del cielo será  $r^2 / R^2 = r^2 = \sin^2 \bar{\theta}$ , donde  $\bar{\theta}$ : es el ángulo cenital promedio para todas las direcciones de azimut. Tenga en cuenta que para mayor claridad en la ilustración, el área de superficie visible proyectada se selecciona sólo para dos puntos y no para el promedio, por lo tanto, la geometría resultante es una elipse en lugar de un círculo. Fuente: Corripio (2003)

Siguiendo el método de la unidad de esfera Iqbal (1983, p 298), el factor de vista del cielo se evalúa como la relación entre la superficie proyectada de la parte visible del hemisferio y el área de

un hemisferio completo de radio unitario. El radio de proyección de la parte visible del hemisferio es igual al seno de los ángulos cenitales promedio en todas las direcciones azimutales. Aquí se usa una variación del algoritmo de sombreado descrito anteriormente para encontrar los ángulos cenitales del horizonte para azimutes seleccionados. Repitiendo el algoritmo de sombreado desde una dirección de azimut dada en pasos decrecientes de valores de elevación, podemos encontrar los ángulos del horizonte para cada celda en esa dirección: este ángulo será complementario al ángulo de elevación actual en la transición de la celda del Sol a la sombra. El valor de elevación inicial no necesita ser más alto que la pendiente máxima de la celda en la cuadrícula. Esto se repite en el intervalo de azimut requerido por encima de  $360^\circ$  y se promedian los resultados. Por lo tanto, la relación de las dos superficies (proyecciones planas hemisféricas visibles y sin obstrucciones) será:

$$v = \frac{\pi r^2}{\pi} = \sin^2 \bar{\theta} \quad (6.63)$$

donde  $v$  es el factor de vista del cielo,  $r$  es el radio del círculo correspondiente a la proyección plana del cielo visible y  $\bar{\theta}$ : es el ángulo cenital promedio del horizonte circundante. Un cálculo típico para un terreno con pendientes de hasta  $45^\circ$  y a intervalos azimutales de  $15^\circ$  requerirá operaciones de  $45 \times 24 \times N$  si  $N$  es el número de celdas en el DEM, que es considerablemente más rápido que las operaciones de  $N^2$  requeridas para una estimación rigurosa de todos los ángulos subtendidos por cada celda con cualquier otra celda en la cuadrícula.

Promedio  $\bar{\theta}$ : implica la suposición de isotropía en el campo de radiación difusa, que es una simplificación poco realista. Si esto no fuera aceptable, el algoritmo sugerido puede usarse para almacenar ángulos de horizonte en cualquier dirección dada, a expensas de más requisitos de memoria. Para una evaluación rigurosa de la influencia del terreno circundante en la radiación que cae sobre cualquier celda, sería necesario realizar un análisis de cuenca visual, en lugar del parámetro simplificado “factor de vista del suelo”. Este punto no se aborda aquí, pero el lector se dirige al trabajo de Wang et al. (2000), que es probablemente el algoritmo de cuenca visual más eficiente hasta la fecha.

Dozier et al. (1981) han desarrollado un algoritmo muy eficiente para el cálculo de horizontes locales que se puede aplicar al cálculo de sombras proyectadas. El algoritmo de sombreado en este documento podría ser más adecuado para el cálculo de sombras en un número limitado de ángulos de iluminación, ya que es rápido y no necesita almacenar información del horizonte para cada dirección de azimut.

#### 6.4.6. Modelado topográfico

En las regiones Andinas, se presentan diferentes tipos de terrenos topográficos que influyen en la regulación de la radiación solar absorbida en la superficie. En algunas áreas rodeadas de terreno empinado también pueden verse muy influenciadas por el sombreado topográfico (Arnold et al., 1996). Debido a la alta variabilidad espacial y temporal en el ángulo incidente y el sombreado topográfico a lo largo del día, comparar el impacto de estos componentes topográficos uno al lado del otro para evaluar la importancia relativa puede ser un desafío. Aquí presentamos las ecuaciones. (6.65) - (6.68) como un medio para abordar este problema. Utilizamos estas ecuaciones para calcular el cambio en la irradiación promediada en el transcurso de un día para un componente topográfico dado.

Se incorporan dos términos adicionales, ángulo incidente y sombreado topográfico, junto con la ecuación. (6.42) para determinar la distribución de la radiación solar en la superficie debido a los efectos topográficos (Olson and Rupper, 2019). La radiación solar potencial de cielo despejado que llega a una superficie inclinada es:

$$I_c = I_a \cos \theta_i S \quad (6.64)$$

donde  $I_a$  es la radiación solar directa de la atmosférica a cielo despejado potencial de la ecuación (6.42);  $\theta_i$  es el ángulo incidente; y  $S$  es sombreado topográfico, a un valor binario que indica si una celda dada está en “sombra”(0) o “sol”(1). El sombreado topográfico se calcula con un algoritmo de trazado de rayos modificado que utiliza un plano de iluminación solar perpendicular al ángulo cenital del sol para determinar si una celda está bloqueada por las celdas circundantes en un cierto ángulo cenital y azimutal (Corripio, 2003). Este método incorpora tanto el sombreado automático del relieve como las sombras proyectadas. El ángulo incidente es el ángulo cenital ( $Z$ ) modificado para una superficie con una pendiente y aspecto específicos (Iqbal, 1983).

Usamos variaciones de la ecuación. (6.64) para determinar el cambio medio diario en la radiación solar a partir de componentes topográficos específicos que se muestran en la Figura. 6.12. Las ecuaciones (6.65) - (6.68) muestran el cambio medio en la irradiancia solar debido a la pendiente y el aspecto (ángulo de incidencia), relieve sombreado, sombras proyectadas y el efecto combinado de estos componentes topográficos:

$$\Delta \bar{I}_{SA} = \frac{1}{t} \int_0^t I_a S [\cos \theta_i - \cos Z] dt \quad (6.65)$$

$$\Delta \bar{I}_{SR} = \begin{cases} \frac{1}{t} \int_0^t I_a S [\cos \theta_i - \cos Z] dt, & \theta_i \geq 90^\circ \\ 0, & \theta_i < 90^\circ \end{cases} \quad (6.66)$$

$$\Delta \bar{I}_{CS} = \frac{1}{t} \int_0^t I_a \cos \theta_i [S - 1] dt \quad (6.67)$$

$$\Delta \bar{I}_{Com} = \frac{1}{t} \int_0^t I_a [S \cos \theta_i - \cos Z] dt \quad (6.68)$$

La ecuación (6.65) muestra el cambio medio diario en la radiación solar debido a la pendiente y el aspecto en relación con un plano horizontal. Al incorporar  $S$  en esta ecuación, se excluyen los valores que se consideran sombreados. El cambio medio en la irradiancia debido al relieve sombreado también es relativo a un plano horizontal (Ec. 6.66), ya que el relieve sombreado también se basa en la presencia de valores de pendiente y aspecto. El relieve sombreado sólo ocurre cuando el ángulo incidente es mayor o igual a 90. La ecuación (6.67) muestra el cambio medio en la irradiancia debido a la sombra proyectada en relación con un plano inclinado sin sombras proyectadas. Esto explica cualquier cambio en la irradiancia debido a la pendiente y el aspecto, así como el relieve sombreado. Por defecto, el relieve sombreado se incorpora tanto en el cálculo del ángulo incidente ( $\theta_i$ ) como en el algoritmo de sombreado utilizado para determinar el sombreado topográfico ( $S$ ). Esto nos permite analizar el impacto individual de cada uno de estos componentes topográficos, para comparar. Finalmente, la ecuación. (6.68) es el efecto combinado de estos tres componentes en relación con un plano horizontal. Para cada una de las ecuaciones descritas anteriormente, el cambio medio en la irradiancia es equivalente a la diferencia integrada en el transcurso de un día (Olson and Rupper, 2019).

La Figura 6.12 muestra la derivación de estas ecuaciones con respecto a la ecuación (6.64) e ilustra los componentes topográficos de interés. Para determinar la influencia de cada componente, se crea una segunda ecuación excluyendo el componente de interés. Las ecuaciones (6.65) - (6.68) calculan la diferencia entre la ecuación (6.64) y un modelo que excluye el componente de la topografía de interés, que luego se integra en el transcurso de un día. El resultado de estas ecuaciones es un cambio en la irradiancia debido a un componente topográfico específico.

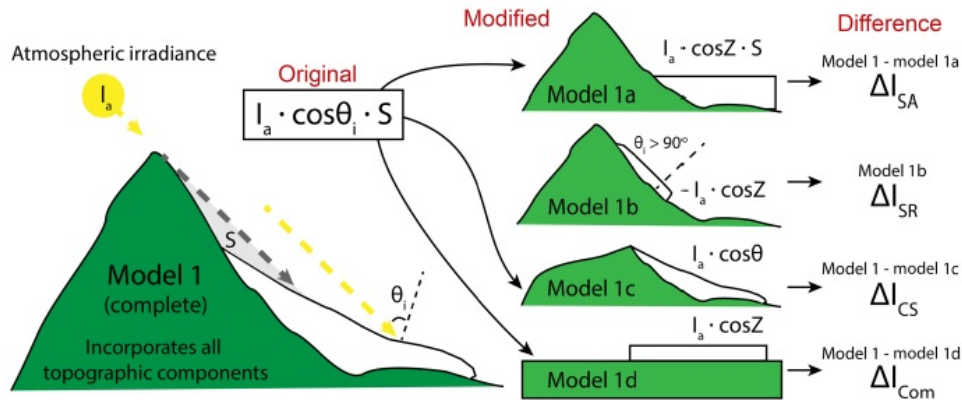


Figura 6.12: El diagrama que ilustra la derivación de las ecuaciones (6.65) - (6.68). El modelo 1 (igual que la ecuación 6.64) es el modelo base e incorpora ambos métodos de sombreado topográfico (S) y el efecto de pendiente y el aspecto ( $\theta_i$ ). También se crean modelos adicionales, cada uno excluyendo algún componente de la topografía. La diferencia entre la ecuación 6.64 (Modelo 1) y la ecuación 6.65 (modelo 1a) muestra el cambio en la irradiancia debido a la pendiente y el aspecto de la superficie del glaciar. La ecuación 6.66 (modelo 1b) calcula la suma de la irradiancia que llegaría a una superficie horizontal en lugares del glaciar donde el ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ) es mayor que  $90^\circ$ . La ecuación 6.66 (modelo 1b) es el único escenario que no depende de la ecuación (6.64) (modelo 1). La diferencia entre la ecuación 6.64 (modelo 1) y la ecuación (6.67) (modelo 1c) muestra el cambio en la irradiancia debido únicamente a las sombras proyectadas. La ecuación (6.68) (modelo 1d) elimina el terreno circundante y asume que la superficie del glaciar es un plano horizontal, la diferencia entre este y el modelo original muestra el efecto combinado de eliminar toda la información topográfica del DEM. Fuente: Olson and Rupper (2019)

Los resultados presentan un cambio medio diario en la irradiancia debido a cada componente topográfico, promediado durante toda la temporada de fusión. Para simplificar, nos referiremos al cambio medio diario en la irradiancia promediado durante la temporada de fusión como el cambio medio en irradiancia.

## 6.5. Evaluación del desempeño de los modelos ETI y SETI.

Para la evaluación de desempeño de la simulación de modelos ETI y SETI vs los valores de balance de masa mensuales observados, se ha optado por utilizar el error absoluto medio (MAE), el error cuadrático medio (RMS) y el sesgo (BIAS) definidos por Pielke (1984) y Stauffer and Seaman

(1990). Éstos estadísticos permiten medir la precisión de la simulación. Por precisión se entiende el promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y valores observados. Por valores observados se entiende aquellos que fueron obtenidos en estaciones de medida glaciológicas.

Para el cálculo de la precisión se utiliza el error medio cuadrático, definido como (Pielke, 1984):

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})^2}{N}} \quad (6.69)$$

Donde,  $\phi_i$  es el valor pronosticado para la celda  $i$ ,  $\phi : iobs$  es el valor observado para la celda  $i$  y  $N$  es el número de valores analizados. El RMS es la raíz cuadrada de la diferencia cuadrática promedio entre el valor pronosticado y el valor observado por el modelo. Se prefiere más en algunos casos porque los errores se cuadran primero antes del promedio, lo que representa una penalización alta en errores grandes. Esto implica que RMS es útil cuando no se desean errores grandes.

El error absoluto medio MAE es la diferencia absoluta entre los valores pronosticados y los observados. El MAE es más robusto para los valores atípicos y no penaliza los errores tan extremadamente como el RMS. MAE es una puntuación lineal que significa que todas las diferencias individuales se ponderan por igual. No es adecuado para aplicaciones en las que desea prestar más atención a los valores atípicos. Lo importante de esta métrica es que penaliza errores enormes no tan mal como lo hace RMS. Por lo tanto, no es tan sensible a los valores atípicos como el error medio cuadrático (Pielke, 1984). El error absoluto medio se define como:

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|\phi_i - \phi_{iobs}|}{N} \quad (6.70)$$

El sesgo (BIAS) representa el error promedio histórico, nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar una variable, está se define como:

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})}{N} \quad (6.71)$$

Básicamente nos cuantifica el error sistemático del modelo. Es decir que al tener un error positivo en un elemento puede compensar un error negativo en otro elemento, un modelo de pronostico puede lograr un sesgo muy bajo y no ser preciso al mismo tiempo. Obviamente, el sesgo por sí solo no será suficiente para evaluar la precisión del pronóstico. Pero un pronóstico muy sesgado ya es una indicación de que algo anda mal en el modelo.

Para la comparación de variables de medidas de estaciones se han calculado el RMS, MAE, BIAS para cada mes, teniendo así una evolución temporal del error y poder analizar con detalle el comportamiento del modelo durante toda la simulación.

En este proyecto se comparó la ablación acumulada (mm como equivalente agua) durante los períodos de medición para probar el rendimiento de los modelos ETI y SETI, ambos utilizando los parámetros originales de (Pellicciotti et al., 2008) y (Carenzo et al., 2009) y recalibrándolos. Para ello, calculamos el error absoluto medio (MAE) y el sesgo (BIAS) en la estimación de las tasas de fusión mensuales. Además, se calculó el balance de masa anual de todo el glaciar y se compararon con los valores observados.

# Capítulo 7

## Aplicación del modelo - Análisis de resultados y conclusiones.

La aplicación de los modelos de índice de fusión superficial de la nieve y el hielo son importantes para la evaluación y manejo correctos de los recursos hídricos (Hamlet and Lettenmaier, 1999) y del balance de masa glaciar.

Los cálculos con estos modelos empíricos son más sencillos porque sólo necesitan datos de entrada de temperatura y variables adicionales que pueden incorporarse mediante parametrizaciones basadas en el tiempo y ubicación. La creciente necesidad de simulaciones de alta resolución temporal y espacial de la velocidad de fusión (por ejemplo, Hock, 2003) han impulsado numerosos intentos de combinar la precisión de los modelos de balance de energía basados físicamente con la simplicidad de los enfoques de índice de temperatura (Pellicciotti et al., 2005). Los resultados de este modelo dependen principalmente de la calidad y disponibilidad de información de estaciones meteorológicas en el glaciar y otras estaciones muy próximas, como también son necesarios los modelos de elevación digital DEM del glaciar.

Partiendo de estos puntos, el análisis de nuestros resultados se enfocó en desarrollar una modificación al modelo de índice de temperatura mejorado (ETI) (Pellicciotti et al., 2005), para analizar y evaluar el cambio que se produciría en los resultados del modelo. Considerando un nuevo enfoque se desarrolló un modelo que considera la variabilidad en la radiación solar directa efectuadas sobre el glaciar, debido al sombreado topográfico que incluye el relieve sombreado, sombras proyectadas, pendiente, aspecto y el combinado de todas las mencionadas. Construido a partir de un DEM mediante su orientación, inclinación y aspecto.

Aplicamos el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) y generamos el Raster de variación de radiación solar incidente para el glaciar Zongo para cada mes entre los años 2004, 2005 y 2006. Estos valores mensuales se obtienen de los valores medios de la posición solar horaria de un día descrita por el ángulo cenit, latitud solar y ángulo horario que son calculados por el método estándar de Iqbal (1983). Y evaluamos la sensibilidad mensual del sombreado topográfico. En este capítulo se mostrarán los resultados realizados en el glaciar para el periodo septiembre 2004 a agosto 2006, éste se divide en dos secciones.

- La sección §7.1.1 muestra los resultados del Modelo de índice de temperatura mejorado (ETI). Después de implementar el modelo de derretimiento ETI, se compararon los resultados contra los valores observados directamente en el terreno glaciar (cambio de la masa

glaciar) sobre las dos gestiones, y posteriormente se realizó la calibración mediante un algoritmo de aproximación de los parámetros de factor de temperatura y factor de radiación de onda corta entrante (TF y SRF) respectivamente que permiten ajustar la salida del modelo para el caso del glaciar Zongo.

- La sección §7.1.2 presenta los resultados del modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI), los resultados del modelo también se compararon con los valores observados directamente en el terreno sobre el glaciar y posteriormente se realizaron los cálculos de calibración de los parámetros TF y SRF óptimos determinados mediante un algoritmo de aproximación para ajustar las salidas del modelo para el glaciar Zongo.

Finalmente el modelo SETI se comparó con los valores del modelo ETI para evaluar el posible efecto en el balance de masa al incorporar la radiación solar directa en la superficie glaciar.

Esta comparación es fundamental para evaluar la incidencia al incorporar la radiación solar directa en los modelos de derretimiento de los glaciares para el cálculo de balance de masa anual debido a la topografía del glaciar (sombras debido a la topografía).

Otros factores que pueden afectar en el sombreado de la topografía pueden ser los aerosoles (deposición de partículas de dióxido de carbono, partículas de polvo generadas por quemas en zonas tropicales amazónicas que son transportadas por las corrientes de aire) que se depositan sobre el glaciar (glaciar plomo) generando el derretimiento debido a un cambio en el albedo de la superficie del glaciar. Este intercambio energético provocado por la radiación solar incidente (reteniendo calor) favorece la fusión de hielo glaciar. Los resultados de nuestro estudio modelo SETI nos permitirá no sólo a calcular el balance de masa anual de un glaciar sino también será un punto inicial para la elaboración de nuevos proyectos de investigación.

## 7.1. Datos de entrada para los modelos ETI y SETI.

Los datos diarios de estos modelos son los medidos en las estaciones del glaciar Zongo, como ser la temperatura del aire, precipitación, radiación global, albedo, humedad relativa, velocidad del viento para dos años hidrológicos septiembre 2004 - agosto 2005 y septiembre 2005 - agosto 2006. La Tabla 7.1 muestra un resumen mensual de los datos diarios medidos en la estación meteorológica del glaciar, para más detalle de los datos diarios ver las Tablas en ANEXOS A.1.

Por su parte otros datos de entrada son los datos de elevación de las estacas y pozos situados en el glaciar Tabla 7.2 (Capítulo 5, Figura 5.19) y el balance de masa acumulado para cada estaca Tablas 7.3 y 7.4.

Tabla 7.1: Resumen de datos de entrada mensuales medidos en las estaciones en el glaciar Zongo para el periodo septiembre 2004 - agosto 2006.

Date	T (°C)	P (mm)	$\alpha$	G ( $W m^{-2}$ )	RH (%)	u ( $m s^{-1}$ )
septiembre 2004	-0.65	1.88	0.66	205.50	74.08	2.35
octubre 2004	0.47	2.39	0.48	236.38	68.04	2.56
noviembre 2004	1.05	3.31	0.37	205.56	78.13	2.12
diciembre 2004	1.27	3.77	0.39	205.35	81.11	1.75
enero 2005	1.16	7.43	0.54	183.42	79.18	1.76
febrero 2005	0.71	8.85	0.80	188.99	85.16	1.88
marzo 2005	1.95	2.07	0.47	223.83	72.27	1.86
abril 2005	1.46	1.24	0.36	188.03	67.43	2.61
mayo 2005	1.23	0.05	0.22	223.68	48.39	3.06
junio 2005	0.03	0.00	0.23	230.32	39.47	3.29
julio 2005	0.17	0.32	0.34	241.59	48.29	2.58
agosto 2005	0.08	0.23	0.42	260.85	44.46	2.81
septiembre 2005	-1.28	1.99	0.65	207.24	73.26	2.60
octubre 2005	0.51	3.57	0.78	187.32	79.26	2.34
noviembre 2005	0.78	4.25	0.66	212.16	75.01	2.25
diciembre 2005	1.08	5.68	0.52	234.50	78.22	1.91
enero 2006	0.11	13.62	0.84	214.53	84.59	1.85
febrero 2006	1.03	5.81	0.74	206.98	79.51	1.98
marzo 2006	1.18	5.51	0.74	187.53	80.87	1.84
abril 2006	1.08	2.40	0.48	197.56	63.79	2.05
mayo 2006	0.50	0.18	0.47	234.29	33.08	2.86
junio 2006	-0.21	0.19	0.49	187.44	43.44	2.67
julio 2006	-0.05	0.02	0.47	220.97	38.45	2.80
agosto 2006	-0.44	0.74	0.51	204.41	57.20	2.64



Tabla 7.2: Datos de elevación para las estacas y pozos en el glaciar Zongo años 2004-2005 y 2005-2006.

Año	Z (m s.n.m.)	Nombre
2004-2005	5119	6K
	5089	9K
	5072	10K
	5064	11K
	5103	4F
	5145	2G
	5236	X1
2004-2005	5800	Pozo 1
	5606	Pozo 2
2005-2006	5186	1H
	5200	1K
	5113	6K
	5168	1N
	5072	7N
	5064	8N
	5046	9N
	5036	10N
	5018	11N
	5004	12N
	4971	13N
	4957	14N
	5190	16N
	5139	2G
	5134	2E
5210	X1	
5244	X2	
2005-2006	5800	Pozo 1
	5500	Pozo 2
	5550	Pozo 3

Tabla 7.3: Datos de entrada de balance de masa mensuales medidos en las balizas en el glaciar Zongo para el periodo septiembre 2004 - agosto 2005.

Z (m s.n.m)		sep-04	oct-04	nov-04	dic-04	ene-05	feb-05	mar-05	abr-05	may-05	jun-05	jul-05	ago-05	$\sum B_m$ (mw.e.)
5116	6K	-0.01	-0.21	-0.545	-0.545	-0.06	-0.02	-0.12	-0.21	-0.44	-0.41	-0.29	-0.12	-2.98
5089	9K	-0.07	-0.62	-0.81	-0.43	-0.43	-0.23	-0.29	-0.37	-0.53	-0.53	-0.48	-0.14	-4.93
5072	10K	-0.18	-0.895	-0.895	-0.78	-0.22	-0.11	-0.84	-0.15	-0.15	-0.15	-0.45	-0.36	-5.18
5064	11K	-0.14	-0.5	-0.91	-0.72	-0.23	-0.16	-0.86	-0.54	-0.76	-1.45	-0.76	-0.36	-7.39
5024	12K	-0.37	-0.87	-0.78	-1.18	-0.46	-0.58	-0.8	-0.61	-0.67	-0.6	-0.16	-0.29	-7.37
5103	4F	0.00	-0.37	-0.425	-0.425	-0.34	-0.13	-0.22	-0.22	-0.55	-0.55	-0.17	-0.37	-3.77
5145	2G	-0.06	-0.42	-0.79	-0.46	-0.03	-0.06	-0.06	-0.39	-0.52	-0.31	-0.09	-0.81	-4.00
5236	X1	0	-0.23	-0.32	-1.04	-0.05	0.08	-0.12	-0.11	-0.02	-0.06	-0.04	-0.05	-1.96

Tabla 7.4: Datos de entrada de balance de masa mensuales medidos en las balizas en el glaciar Zongo para el periodo septiembre 2005 - agosto 2006.

Z (m asl)		sep-05	oct-05	nov-05	dic-05	ene-06	feb-06	mar-06	abr-06	may-06	jun-06	jul-06	ago-06	$\sum B_m$ (mw.e.)
5186	1H	-0.11	0.09	0.27	-0.47	0.2	0.05	-0.09	0.39	-0.39	-0.15	-0.2	-0.12	-0.53
5200	1K	0	0.49	-0.10667	-0.106667	-0.10667	-0.25	0.56	0.38	-0.07	-0.58	-0.265	-0.265	-0.32
5113	6K	0.03	0.38	-0.29	-0.57	0.25	-0.09	0.03	0.29	-0.27	-0.07	-0.2	-0.06	-0.57
5168	1N	-0.07	0.15	0.18	-0.32	0.24	-0.08	0.06	0.53	-0.21	0.01	-0.2	0.02	0.31
5072	7N	-0.11	0.09	-0.37	-0.57	-0.055	-0.055	-0.22	0.13	-0.55	-0.49	-0.24	-0.15	-2.59
5064	8N	-0.21	0.16	-0.43	-0.95	0.14	-0.23	-0.12	-0.04	-0.55	-0.18	-0.33	-0.33	-3.07
5046	9N	-0.22	-0.02	-0.44	-0.81	0.03	-0.16	-0.31	-0.32	-0.78	-0.31	-0.32	-0.34	-4
5036	10N	-0.4	-0.17	-0.41	-0.84	0.1	-0.35	-0.59	-0.26	-0.76	-0.45	-0.34	-0.47	-4.94
5018	11N	-0.18	0.03	-0.69	-0.76	0.04	-0.19	-0.57	-0.35	-0.63	-0.5	-0.29	-0.17	-4.26
5004	12N	-0.24	0.07	-0.7	-0.89	-0.06	-0.37	-0.65	-0.54	-0.78	-0.78	-0.62	-0.54	-6.1
4971	13N	-0.04	-0.02	-0.81	-0.96	-0.13	-0.53	-0.61	-0.49	-0.53	-0.31	-0.47	-0.43	-5.33
4957	14N	-0.32	-0.07	-0.78	-0.9	-0.05	-0.5	-0.64	-0.45	-0.73	2.73	-3.66	-0.59	-5.96
5190	16N	-0.11	0.12	0.09	-0.31	0.27	-0.02	-0.01	0.43	-0.31	-0.18	-0.26	-0.29	-0.58
5139	2G	0.02	0.06	0.07	-0.39	0.21	-0.1	0	0.28	-0.2	-0.14	-0.165	-0.165	-0.52
5134	2E	-0.15	0	0	0.43	-0.63	-0.05	-0.09	0.36	-0.22	0.05	0.13	-0.27	-0.44
5210	X1	0.11	0.02	0.1	-0.46	0.29	-0.1	0	0.17	0.28	0.03	-0.07	0.01	0.38
5244	X2	0.08	0.03	0.22	-0.49	0.41	-0.25	0.01	0.18	0.22	0.19	-0.11	-0.12	0.37

Utilizando la información medida por la estación meteorológica automática (ORE Zongo a 5050 m s.n.m.) se realizó el cálculo del derretimiento para los modelos ETI y SETI, para su cálculo se requiere optimizar los valores de los parámetros cuyos rangos se presentan en los artículos de (Pellicciotti et al., 2008) y (Carenzo et al., 2009). En la Tabla 7.5 se presentan los rangos de los parámetros “factor de temperatura (TF)” y “factor de radiación de onda corta (SRF)” a partir de los cuales se corrieron los modelos. El código de estos modelos se adjunta en la sección de ANEXOS A.2.

### Parámetros de los modelos ETI y SETI

Las tablas 7.6 y 7.7 para el modelo ETI y las tablas 7.8 y 7.9 para el modelo SETI resumen el conjunto de parámetros óptimos para el glaciar Zongo para los años 2004 - 2005 y 2005 - 2006, estos parámetros fueron obtenidos utilizando un procedimiento matemático de optimización. El método consiste en hallar valores óptimos considerando las restricciones de borde y el valor objetivo, este método se incluyó en la codificación del Modelo ETI y modelo SETI, realizada en el lenguaje R (lenguaje de programación R, Package “Modelo ETI”, “Modelo SETI”).

El error absoluto medio (MAE) fue seleccionado como la función objetivo para que los parámetros óptimos produjeran el valor mínimo, teniendo en cuenta el rango físico aceptable de los parámetros provistos por Pellicciotti et al. (2008) y Carenzo et al. (2009), en comparación a bias (sesgo) que puede compensar los errores, es decir un error positivo en un elemento puede compensar un error negativo en otro elemento. Obviamente, el sesgo por si solo no es suficiente para evaluar la precisión de nuestro pronóstico. Pero un pronóstico muy sesgado ya es una indicación de que algo anda mal en el modelo.

El problema de optimización fue definido por la restricción  $T > T_T$ , donde  $T_T$  era desconocida. Su valor óptimo fue ajustado por condiciones de borde obtenidas de los estudios de (Pellicciotti

et al., 2008) y (Carenzo et al., 2009), de estos artículos se consideraron los rangos de valores de TF y SRF ver tabla 7.5, hasta obtener el mejor ajuste entre el balance de masa mensual acumulado observado y el simulado. El tiempo de cálculo al realizar la optimización de los modelos ETI y SETI para hallar los valores autocalibrados de TF y SRF son 1.36 minutos. Esto se debe a la función de secuencia en el código que se le asigna un valor igual a cinco, que calcula cinco alternativas de combinaciones posibles de los valores de TF y SRF con sus respectivos errores y gráficas, esta combinación de alternativas se puede ver en la columna 9 de las tablas 7.8 y 7.9. En ANEXOS A.3. se muestra a detalle las combinaciones de valores autocalibrados de TF y SRF para una estaca.

Si se desea ser más precisos en la obtención de los valores de TF y SRF la longitud de la secuencia en el código debería ser mayor al número elegido en este estudio (valor de dos dígitos), pero con ese nuevo valor el procedimiento de cálculo resultaría un poco moroso debido al tiempo de computo para procesar todo el cálculo, si se tuvieran máquinas con mayor capacidad de RAM podrían cambiar el valor de la longitud de la secuencia en unos dos dígitos o más y con eso se obtendrían más valores de iteraciones para TF y SRF en el modelo propuesto.

Las tablas 7.6 y 7.7 para el modelo ETI y las tablas 7.8 y 7.9 para el modelo SETI resumen el conjunto de parámetros óptimos para el glaciar Zongo, estos parámetros dan a conocer los distintos valores que pueden adoptar TF y SRF para cada estaca ubicada en el glaciar, para los dos años hidrológicos 2004 - 2005 y 2005 - 2006. Considerando las diferentes condiciones climáticas típicas de cada temporada (húmeda y seca) que tiene como característica el glaciar.

Tabla 7.5: Rangos de los parámetros TF y SRF tomados de la literatura.

Parámetro	Unidad	(Pellicciotti et al., 2008)	(Carenzo et al., 2009)	(Fuchs et al., 2016)
Factor de Temperatura (TF)	$mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$	(-0.48 - 2.16)	(-0.24 - 1.92)	(0.20 - 1.19)
Factor de radiación de onda corta (SRF)	$mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$	(0.209 - 0.257)	(0.211 - 0.254)	(0.171 - 0.247)

Tabla 7.6: Parámetros óptimos utilizados para ocho estacas en la simulación de ETI para el periodo 2004-2005.

Estaca	TF wet ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ )	SRF wet ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ )	TF dry ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ )	SRF dry ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ )	MAE ( $mm \text{ dia}^{-1}$ )	bias ( $mm \text{ dia}^{-1}$ )	RMS ( $mm \text{ dia}^{-1}$ )
6K	1.9000	0.1315	0.9600	0.07025	0.900	0.183	1.121
9K	1.9000	0.1928	0.0200	0.1315	1.267	0.767	1.764
10K	1.9000	0.2540	1.9000	0.07025	1.650	1.350	2.528
11K	1.9000	0.1928	0.0200	0.254	1.483	0.200	1.939
12K	1.9000	0.2540	1.9000	0.1315	1.408	1.392	1.705
4F	1.4300	0.1315	0.0200	0.1315	1.000	0.067	1.261
2G	0.9600	0.1928	1.9000	0.07025	1.042	0.492	1.572
X1	0.0200	0.2540	0.0200	0.009	1.142	-0.725	1.580

Tabla 7.7: Parámetros óptimos utilizados para 17 estacas en la simulación de ETI para el año 2005-2006.

Estaca	TF wet ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ )	SRF wet ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ )	TF dry ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ )	SRF dry ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ )	MAE ( $mm\ dia^{-1}$ )	bias ( $mm\ dia^{-1}$ )	RMS ( $mm\ dia^{-1}$ )
1H	1.9000	0.07025	0.0200	0.07025	1.1417	0.2083	1.6855
1K	0.4900	0.07025	1.4300	0.009	1.9000	-1.0667	2.6593
6K	1.9000	0.07025	1.9000	0.009	1.5917	-0.6917	2.6550
1N	0.0200	0.07025	0.0200	0.009	1.1667	-0.3667	1.4860
7N	0.4900	0.1315	0.0200	0.1315	1.2000	-0.5833	1.8846
8N	1.4300	0.1315	0.0200	0.1315	1.6833	0.1167	2.3292
9N	1.4300	0.1315	0.0200	0.19275	1.3167	0.2833	1.6916
10N	0.0200	0.19275	0.0200	0.19275	1.0833	0.2000	1.9643
11N	1.9000	0.1315	0.0200	0.19275	1.2667	0.1667	1.8877
12N	0.0200	0.19275	1.4300	0.19275	1.6917	-1.2417	2.9401
13N	1.9000	0.1315	0.4900	0.19275	2.6250	-0.4417	3.6696
14N	0.0200	0.19275	0.9600	0.1315	2.5833	-2.3333	4.2295
16N	1.9000	0.07025	1.9000	0.009	1.0000	0.4833	1.4663
2G	1.9000	0.07025	1.9000	0.009	0.7583	-0.0250	1.0420
2E	0.0200	0.1315	0.0200	0.009	1.5667	-0.3167	2.5758
X1	1.9000	0.07025	0.0200	0.009	1.3333	-0.2667	1.5253
X2	1.9000	0.07025	0.0200	0.009	1.1583	-0.0250	1.4003



Tabla 7.8: Parámetros óptimos utilizados para la simulación de SETI para el año 2004-2005. Relieve sombreado (SR), Pendiente y aspecto (SA), Sombras Proyectadas (CS) y el combinado de los parámetros (C)

Estaca	TF wet ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ )	SRF wet ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ )	TF dry ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ )	SRF dry ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ )	MAE ( $mm\ dia^{-1}$ )	bias ( $mm\ dia^{-1}$ )	RMS ( $mm\ dia^{-1}$ )	Alternativa
6K								
SR	0.9600	0.2540	0.0490	0.07025	1.483	-0.933	2.220	3-5-2-2
SA	1.9000	0.1315	1.9000	0.009	2.058	0.725	2.412	5-3-5-1
CS	1.9000	0.0090	1.9000	0.009	3.308	3.308	3.623	5-1-5-1
C	1.9000	0.0090	0.0200	0.07025	2.450	1.450	3.105	5-1-1-2
9K								
SR	1.9000	0.2540	1.9000	0.1315	2.325	1.242	2.951	5-5-5-3
SA	1.9000	0.1928	1.9000	0.009	2.833	1.783	3.336	5-4-5-1
CS	1.9000	0.0090	0.0200	0.07025	5.942	4.492	7.254	5-1-1-2
C	1.9000	0.0090	0.0200	0.1315	5.550	4.017	7.022	5-1-1-3
10K								
SR	1.9000	0.2540	1.9000	0.1315	4.492	4.442	5.877	5-5-5-3
SA	1.9000	0.2540	1.9000	0.009	2.525	1.158	3.666	5-5-5-1
CS	1.9000	0.0090	0.0200	0.07025	8.783	7.733	10.861	5-1-1-2
C	1.9000	0.0090	0.4900	0.1315	7.950	7.167	10.334	5-1-2-3
11K								
SR	1.9000	0.2540	1.9000	0.254	2.900	0.300	3.510	5-5-5-5
SA	0.0200	0.2540	1.9000	0.009	5.317	0.883	6.402	1-5-5-1
CS	1.9000	0.0090	1.9000	0.07025	6.775	6.725	7.925	5-1-5-2
C	1.9000	0.0090	0.0200	0.19275	6.717	4.100	7.931	5-1-1-4
12K								
SR	1.9000	0.2540	0.0200	0.254	4.242	3.892	5.795	5-5-1-5
SA	1.9000	0.2540	1.9000	0.009	5.100	2.333	6.505	5-5-5-1
CS	1.9000	0.0090	1.9000	0.07025	10.908	10.908	12.687	5-1-5-2
C	1.9000	0.0090	1.9000	0.19275	9.583	7.850	11.723	5-1-5-4
4F								
SR	1.9000	0.1928	0.0200	0.1315	1.725	-0.375	2.202	5-4-1-3
SA	1.9000	0.1315	1.9000	0.009	2.475	1.442	2.973	5-3-5-1
CS	1.9000	0.0090	0.0200	0.07025	4.292	0.242	4.632	5-1-1-2
C	1.9000	0.0090	1.9000	0.07025	2.683	1.967	3.326	5-1-5-2
2G								
SR	1.9000	0.2540	0.0200	0.1315	1.900	0.700	2.338	5-5-1-3
SA	1.9000	0.1928	1.9000	0.009	2.225	0.642	2.668	5-4-5-1
CS	1.9000	0.0090	0.0200	0.07025	5.267	2.533	6.105	5-1-1-2
C	1.9000	0.0090	1.9000	0.07025	4.167	4.000	5.577	5-1-5-2
X1								
SR	1.9000	0.2540	1.9000	0.07025	2.417	1.333	3.273	5-5-5-2
SA	1.9000	0.1928	1.9000	0.009	2.175	0.258	2.926	5-4-5-1
CS	1.9000	0.0090	1.9000	0.009	4.675	4.675	5.399	5-1-5-1
C	1.9000	0.0090	0.0200	0.07025	3.517	2.583	4.713	5-1-1-2

Tabla 7.9: Parámetros óptimos utilizados para la simulación de SETI para el año 2005-2006. Relieve sombreado (SR), Pendiente y aspecto (SA), Sombras Proyectadas (CS) y el combinado de los parámetros (C)

Estaca	TF wet ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ )	SRF wet ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ )	TF dry ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ )	SRF dry ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ )	MAE ( $mm\ dia^{-1}$ )	bias ( $mm\ dia^{-1}$ )	RMS ( $mm\ dia^{-1}$ )	Alternativa
IH								
SR	0.0200	0.1315	1.4300	0.009	1.2000	-0.4667	1.9092	1-3-4-1
SA	0.0200	0.07025	0.0200	0.009	1.7083	-0.6417	2.4605	1-2-1-1
CS	1.9000	0.009	1.9000	0.009	1.1000	0.3333	1.6533	5-1-5-1
C	1.9000	0.009	1.4300	0.009	1.0917	0.3417	1.6889	5-1-4-1
IK								
SR	0.4900	0.07025	0.4900	0.009	1.9167	-1.0167	2.7598	2-2-2-1
SA	1.9000	0.009	1.4300	0.009	2.1083	0.4250	2.7315	5-1-4-1
CS	0.0200	0.009	0.0200	0.009	1.9250	-1.2750	2.6719	1-1-1-1
C	0.0200	0.009	0.0200	0.009	1.9750	-1.2083	2.7128	1-1-1-1
6K								
SR	1.9000	0.07025	0.9600	0.009	1.7667	-1.1000	3.1909	5-2-3-1
SA	0.0200	0.07025	0.0200	0.009	2.3750	-2.3250	4.1244	1-2-1-1
CS	1.9000	0.009	0.0200	0.009	1.3417	-0.7417	2.3293	5-1-1-1
C	1.9000	0.009	0.4900	0.009	1.3833	-0.8167	2.5033	5-1-2-1
IN								
SR	0.0200	0.07025	0.0200	0.009	1.3083	-0.5750	1.6343	1-2-1-1
SA	1.9000	0.009	1.9000	0.009	1.4167	1.0667	1.7875	5-1-5-1
CS	0.0200	0.009	0.0200	0.009	1.4417	-0.7750	1.7125	1-1-1-1
C	0.0200	0.009	0.0200	0.009	1.3750	-0.7750	1.7022	1-1-1-1
7N								
SR	0.0200	0.1315	0.9600	0.07025	1.9417	-1.6417	3.2533	1-3-3-2
SA	1.9000	0.07025	1.9000	0.009	2.7167	0.8833	3.3264	5-2-5-1
CS	1.9000	0.009	0.0200	0.07025	3.0167	0.5167	3.2481	5-1-1-2
C	1.9000	0.009	1.4300	0.07025	2.4500	1.8333	2.7662	5-1-4-2
8N								
SR	0.9600	0.1315	0.0200	0.07025	1.9667	-1.2000	3.5970	3-3-1-2
SA	1.9000	0.07025	1.9000	0.009	3.8583	2.0250	4.3285	5-2-5-1
CS	1.9000	0.009	0.0200	0.07025	3.7750	1.6417	4.3876	5-1-1-2
C	1.9000	0.009	1.9000	0.07025	3.2583	2.9917	4.0848	5-1-5-2
9N								
SR	1.4300	0.1315	1.9000	0.07025	1.7917	-0.8917	3.1226	4-3-5-2
SA	1.9000	0.07025	1.9000	0.009	4.5500	3.4667	5.0148	5-2-5-1
CS	1.9000	0.009	0.0200	0.07025	3.7667	2.4500	4.3962	5-1-1-2
C	1.9000	0.009	0.4900	0.1315	3.5417	2.1750	4.2873	5-1-2-3
10N								
SR	1.9000	0.1315	0.9600	0.1315	1.9417	0.6417	2.4737	5-3-3-3
SA	0.0200	0.1315	1.9000	0.009	4.3500	0.7167	5.9422	1-3-5-1
CS	1.9000	0.009	1.9000	0.07025	5.4333	5.2833	6.8626	5-1-5-2
C	1.9000	0.009	1.9000	0.1315	5.7500	5.1000	6.6484	5-1-5-3
11N								
SR	1.9000	0.1315	1.9000	0.07025	2.0250	-1.0417	3.6177	5-3-5-2
SA	0.0200	0.1315	1.9000	0.009	4.8833	-2.2833	6.3177	1-3-5-1

CS	1.9000	0.009	0.0200	0.07025	3.9167	2.3333	4.5451	5-1-1-2
C	1.9000	0.009	1.4300	0.1315	3.5500	1.9333	4.3751	5-1-4-3
I2N								
SR	1.9000	0.1315	1.9000	0.1315	2.2333	-1.1333	3.9281	5-3-5-3
SA	0.0200	0.1315	1.9000	0.009	5.8167	-0.8667	7.2146	1-3-5-1
CS	1.9000	0.009	1.9000	0.07025	4.1333	4.0167	5.3694	5-1-5-2
C	1.9000	0.009	1.9000	0.1315	4.7750	3.8583	5.4256	5-1-5-3
I3N								
SR	1.9000	0.1315	1.9000	0.07025	3.6500	-2.4500	6.2627	5-3-5-2
SA	0.0200	0.1315	1.9000	0.009	5.2000	-2.8000	7.3001	1-3-5-1
CS	1.9000	0.009	0.0200	0.07025	4.0917	2.1250	4.8965	5-1-1-2
C	1.9000	0.009	0.4900	0.1315	3.7750	1.8750	4.6229	5-1-2-3
I4N								
SR	1.9000	0.1315	1.9000	0.07025	3.0083	-1.9583	5.1146	5-3-5-2
SA	1.9000	0.07025	1.9000	0.009	6.0500	4.7500	6.9193	5-2-5-1
CS	1.9000	0.009	0.0200	0.07025	5.8250	2.8583	6.7277	5-1-1-2
C	1.9000	0.009	0.0200	0.1315	5.8000	2.6000	6.4751	5-1-1-3
I6N								
SR	1.9000	0.07025	1.9000	0.009	1.1083	0.3250	1.4448	5-2-5-1
SA	0.0200	0.07025	0.0200	0.009	1.7750	-0.8083	2.3326	1-2-1-1
CS	1.9000	0.009	0.0200	0.009	0.9500	0.3333	1.4283	5-1-1-1
C	1.9000	0.009	0.0200	0.009	0.9083	0.3083	1.4734	5-1-1-1
2G								
SR	1.9000	0.07025	1.4300	0.009	0.9167	-0.2500	1.3172	5-2-4-1
SA	0.0200	0.07025	0.0200	0.009	1.4750	-1.2917	2.1724	1-2-1-1
CS	0.9600	0.009	0.0200	0.009	0.6167	-0.0167	0.9046	3-1-1-1
C	1.4300	0.009	0.9600	0.009	0.6667	-0.2333	0.9687	4-1-3-1
2E								
SR	0.0200	0.1315	0.0200	0.009	1.6750	-0.7583	2.4855	1-3-1-1
SA	0.0200	0.07025	0.0200	0.009	1.5667	0.0000	2.5716	1-2-1-1
CS	1.9000	0.009	1.4300	0.009	1.8750	0.8750	2.5431	5-1-4-1
C	1.9000	0.009	1.9000	0.009	1.7333	0.8333	2.4863	5-1-5-1
XI								
SR	1.9000	0.07025	0.0200	0.009	1.5417	-0.2750	1.7604	5-2-1-1
SA	0.0200	0.07025	0.4900	0.07025	1.0417	-0.6417	1.4523	1-2-2-2
CS	1.9000	0.009	0.0200	0.009	1.4167	-0.6500	1.6000	5-1-1-1
C	1.9000	0.009	0.0200	0.009	1.3250	-0.5917	1.5058	5-1-1-1
X2								
SR	1.9000	0.07025	0.0200	0.009	1.3583	0.0250	1.5971	5-2-1-1
SA	0.4900	0.07025	0.0200	0.07025	0.7250	-0.2917	1.0611	2-2-1-2
CS	1.4300	0.009	0.0200	0.009	1.2333	-0.5333	1.4933	4-1-1-1
C	1.9000	0.009	0.0200	0.009	1.1500	-0.5333	1.4254	5-1-1-1

Las Tablas 7.6 y 7.7 para el caso modelo ETI, muestran valores calibrados de SRF wet (temporada húmeda) cercanos al rango de valores de  $(0.211-0.254 \text{ mm dia}^{-1} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1})$  Carenzo et al. (2009), Pellicciotti et al. (2008) y Fuchs et al. (2016), esto quiere decir que para las condiciones del glaciar Zongo (altitud elevada que se extiende sobre los 4900 a 6000 m s.n.m. y latitud baja de  $16^\circ\text{S}$ ) presenta una alta contribución de radiación solar para el derretimiento para el año 2004 a 2005 porque esas condiciones físicas geográficas son constantes no varía de un año a otro, por su parte para el año 2005-2006 la mitad de las estacas muestran valores calibrados dentro del rango de los parámetros de la bibliografía y los restantes son cercanos a cero. En el caso de la temporada seca el SRF dry en el año 2004-2006, todas las estacas obtuvieron valores más bajos y cercanos a cero. La entrada de radiación solar más alta da como resultado una contribución más alta de radiación de onda corta y, por lo tanto un SRF más alto que se acerca mucho a su valor de base física.

Similarmente los valores calibrados de TF wet para las estacas en el periodo de 2004 a 2005 están dentro del rango de los parámetros de Carenzo et al. (2009), Pellicciotti et al. (2008) y Fuchs et al. (2016), esto indica que hay una contribución positiva de los términos dependientes de la temperatura del balance de masa (radiación de onda larga y flujos turbulentos) para el derretimiento, del mismo modo para el año 2005-2006. Sin embargo se obtuvieron valores cercanos a cero, esto significa que las simulaciones con  $TF = 0$  conducen a una disminución muy pequeña en el rendimiento del modelo.

En las Figuras 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 se muestran los valores calibrados de TF y SRF para el año 2004-2006 en cada una de las estacas. Las etiquetas “6K, 9K, 10K, 11K, 12K, 4F, 2G, X1” y “1H, 1K, 6K, 1N, 7N, 8N, 9N, 10N, 11N, 12N, 13N, 14N, 16N, 2G, 2E, X1, X2” y las etiquetas de líneas guía indican las estacas situadas en el glaciar para el periodo 2004-2005 y 2005-2006, respectivamente. Los puntos de colores en las Figuras representan los valores obtenidos de TF y SRF estos se expresan en  $\text{mm dia}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  y  $\text{mm dia}^{-1} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$ , respectivamente.

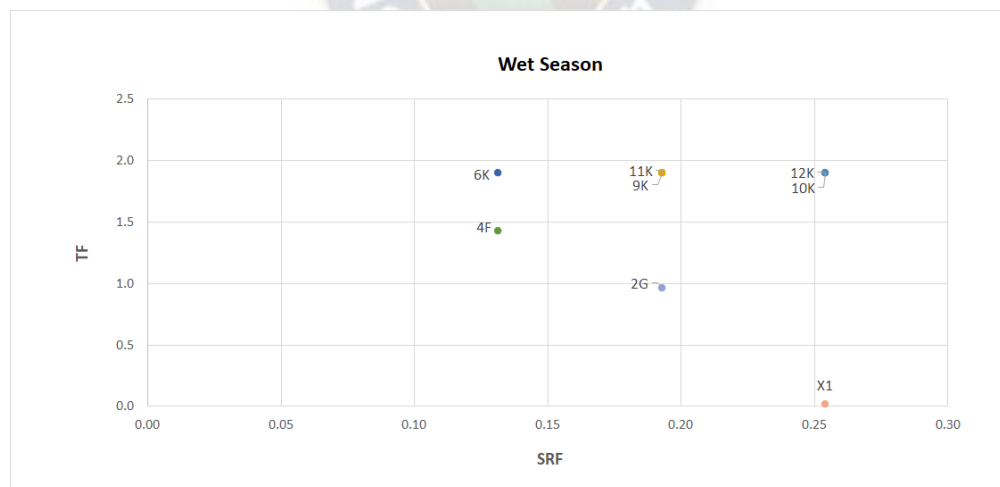


Figura 7.1: Valores calibrados de TF ( $\text{mm dia}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) y SRF ( $\text{mm dia}^{-1} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005.



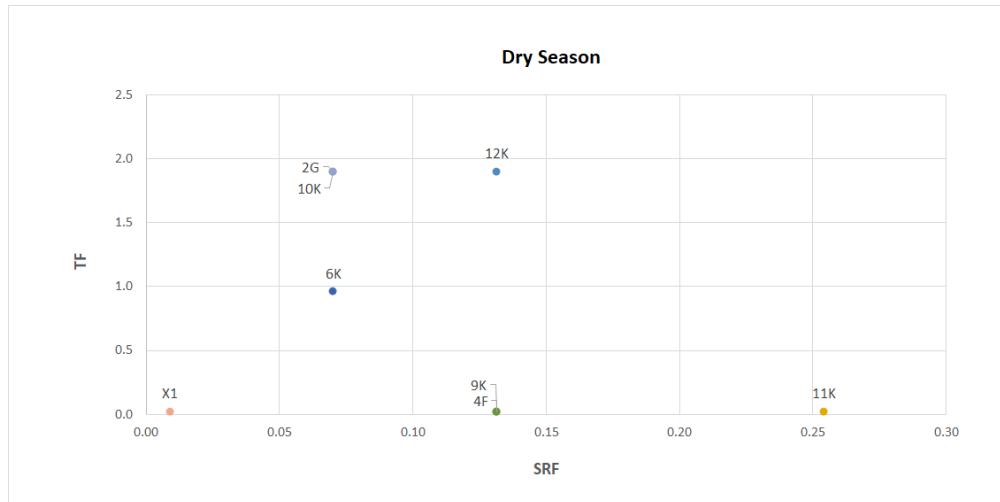


Figura 7.2: Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005.

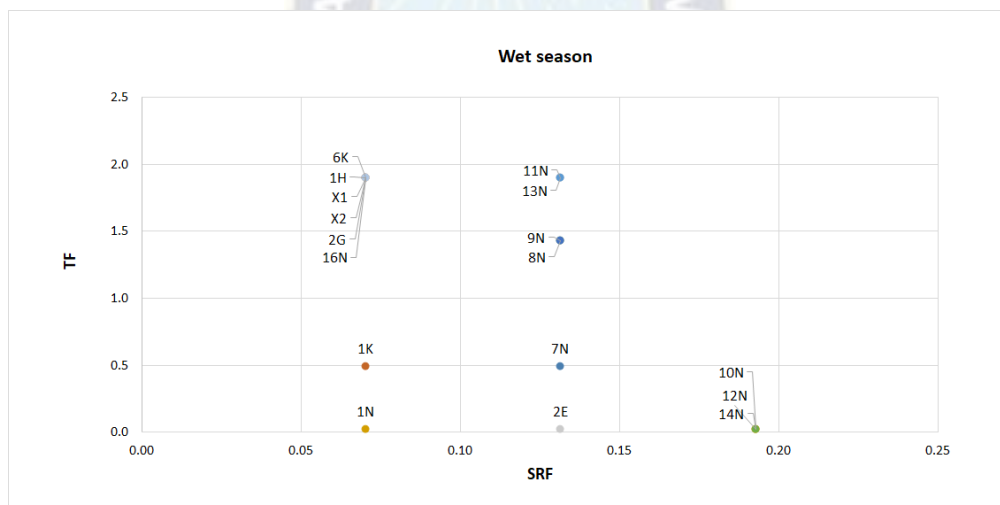


Figura 7.3: Valores calibrados de TF ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ ) y SRF ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006.

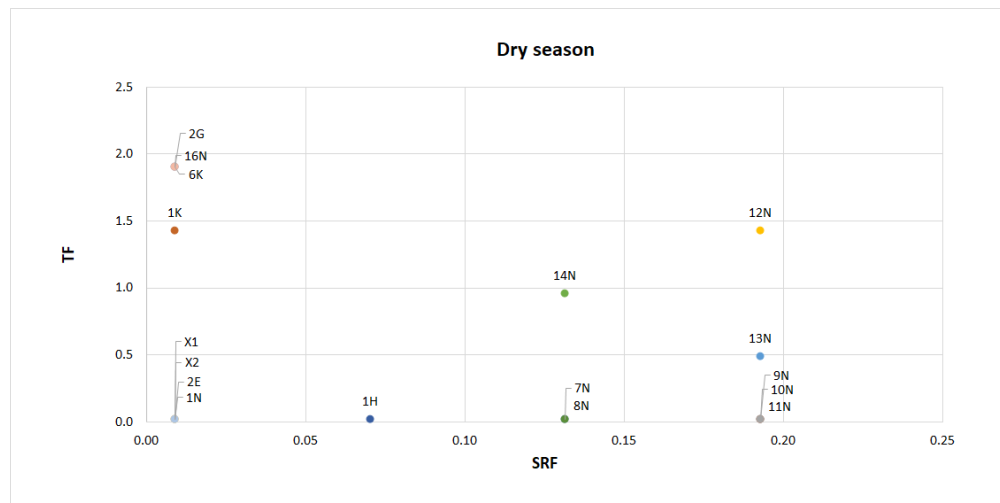


Figura 7.4: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006.

Del mismo modo en las Tablas 7.8 y 7.9 para el modelo SETI presentan valores calibrados de SRF wet más bajos de los rangos de Carenzo et al. (2009) y Pellicciotti et al. (2008) y cercanos a cero exceptuando las estacas (6K, 9K, 10K, 11K, 12K, 2G, X1) para los factores topográficos como el relieve sombreado, pendiente y aspecto, sin embargo para los restantes factores topográficos como sombras proyectadas y el combinado de los parámetros topográficos presentan valores calibrados cercanos a cero, debido a su baja cantidad de radiación solar recibida. Por su parte los valores calibrados de TF wet están dentro del rango de los parámetros de Pellicciotti et al. (2008), Carenzo et al. (2009) y Fuchs et al. (2016), esto indica que hay una contribución positiva de los términos dependientes de la temperatura del balance de masa para el derretimiento. Del mismo modo para el año 2005-2006 exceptuando algunas estacas que presentan valores cercanos a cero, esto quiere decir que alteran muy poco en el modelo. En la temporada seca se obtuvieron valores cercanos a los rangos de los parámetros de Pellicciotti et al. (2008), Carenzo et al. (2009) y Fuchs et al. (2016) para los dos años hidrológicos y en algunos casos valores cercanos a cero. En las Figuras 7.5 - 7.12 se muestran los valores calibrados de TF y SRF para los años 2004-2006. Las etiquetas “6K, 9K, 10K, 11K, 12K, 4F, 2G, X1” y “1H, 1K, 6K, 1N, 7N, 8N, 9N, 10N, 11N, 12N, 13N, 14N, 16N, 2G, 2E, X1, X2” y etiquetas de líneas guía, indican las estacas situadas en el glaciar para el periodo 2004-2005 y 2005-2006, respectivamente. Los puntos de colores en las Figuras representan los valores obtenidos de TF y SRF para cada estaca y se expresan en  $mm \text{ dia}^{-1} \text{ °C}^{-1}$  y  $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ , respectivamente. “SR” significa Relieve sombreado, “SA” Pendiente y aspecto, “CS” Sombras Proyectadas y “C” el combinado de los parámetros.

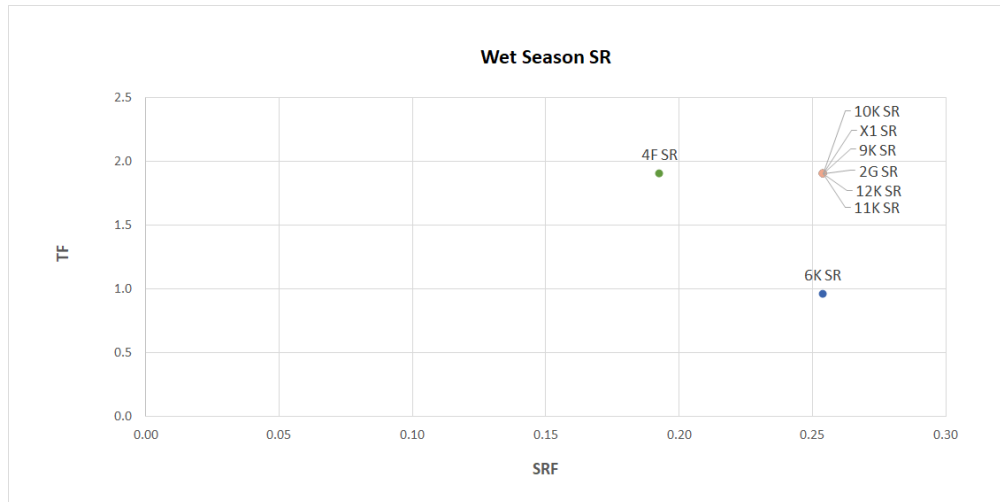


Figura 7.5: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005.

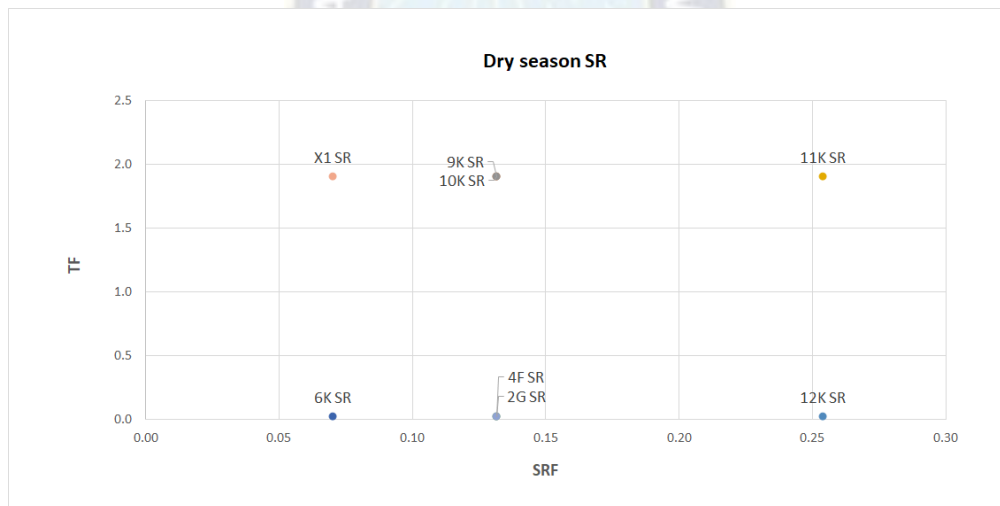


Figura 7.6: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005.

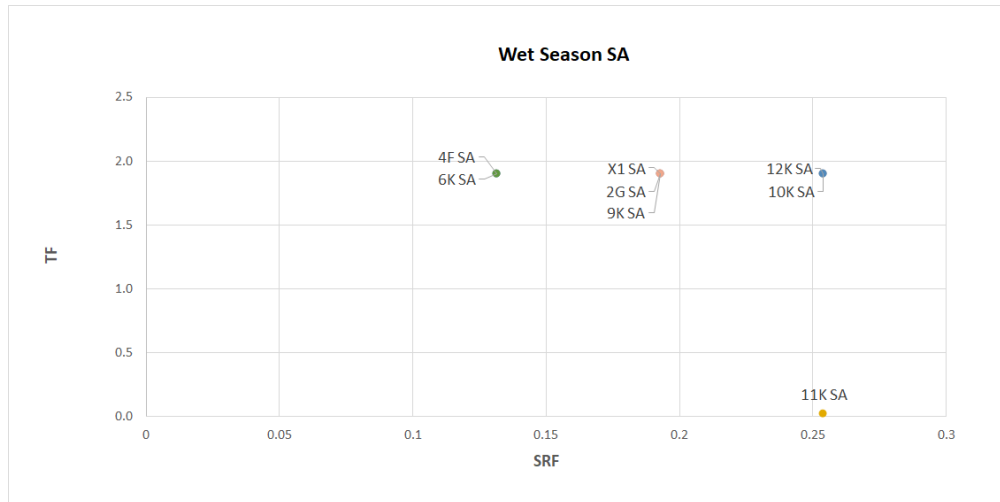


Figura 7.7: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005.

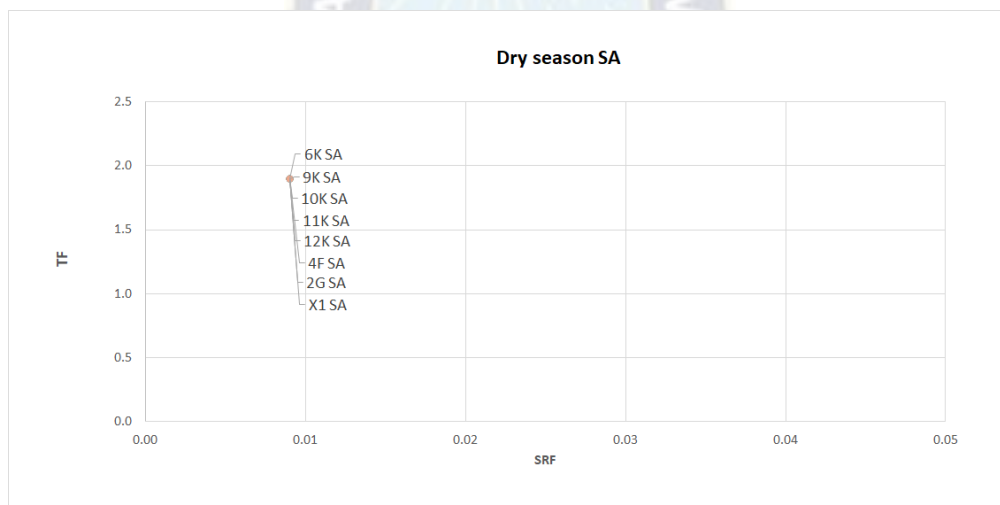


Figura 7.8: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005.

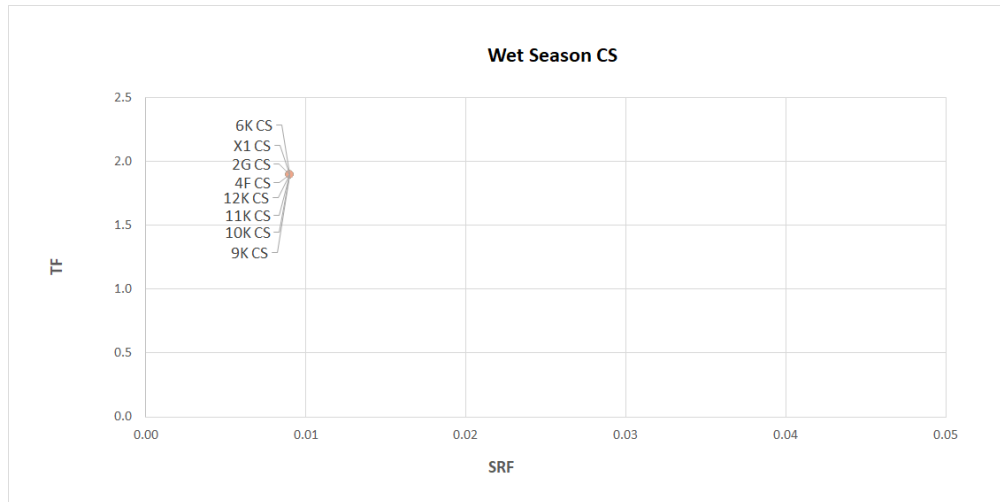


Figura 7.9: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005.

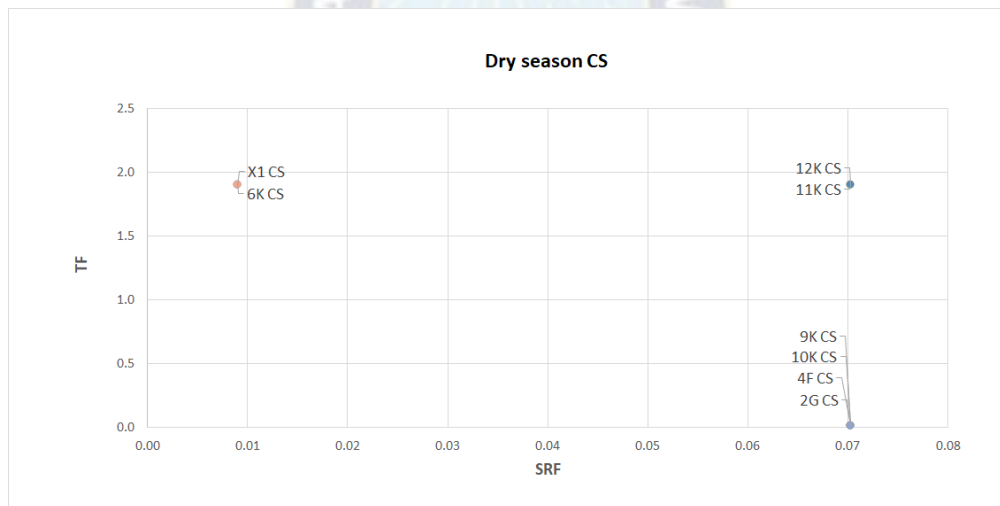


Figura 7.10: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005.

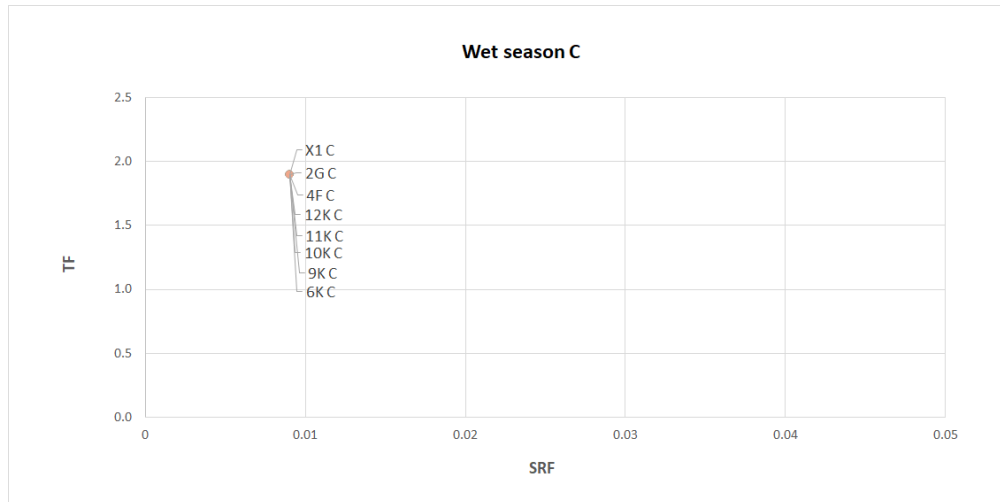


Figura 7.11: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2004-2005.

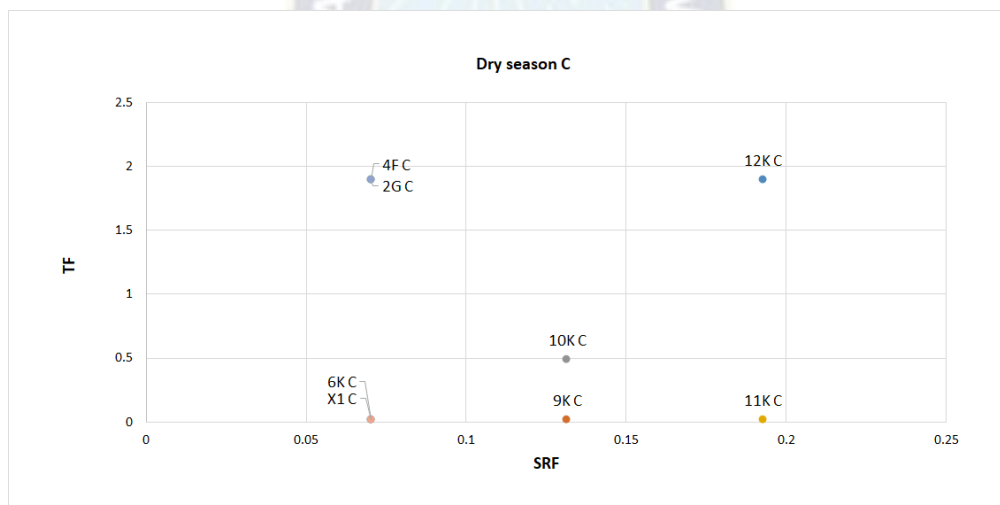


Figura 7.12: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en ocho estacas para la temporada seca durante el periodo 2004-2005.

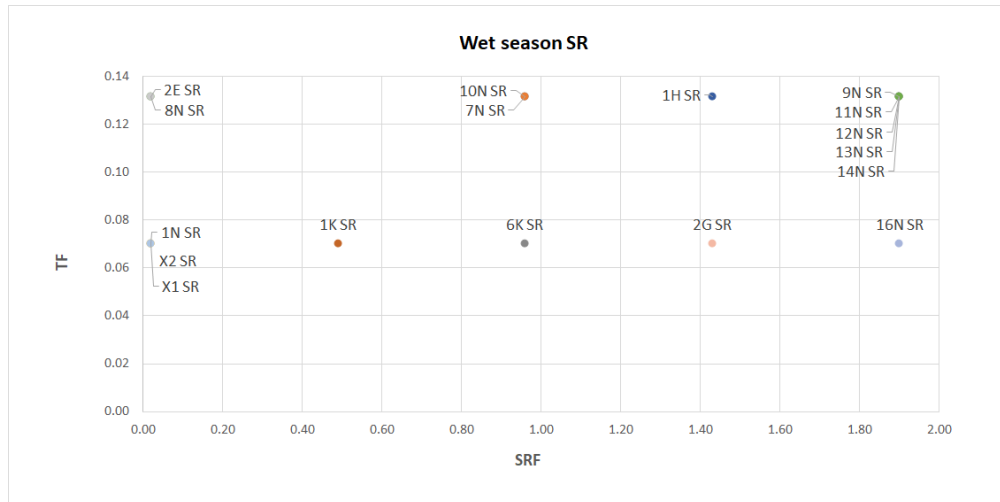


Figura 7.13: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006.

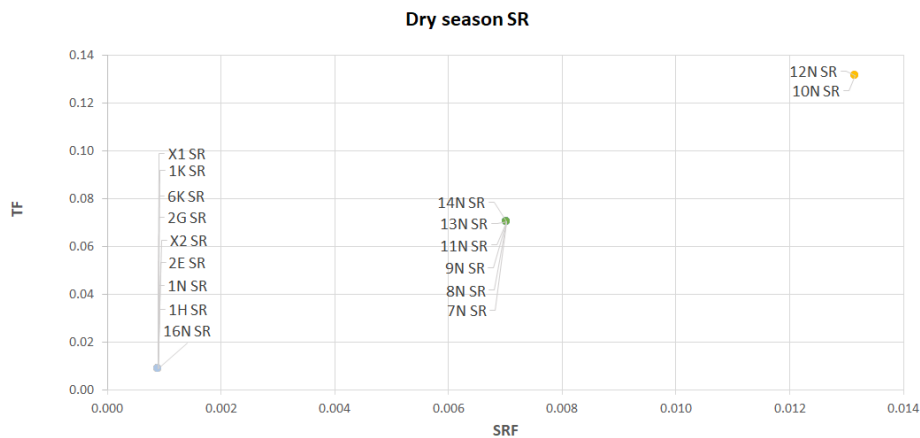


Figura 7.14: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006.

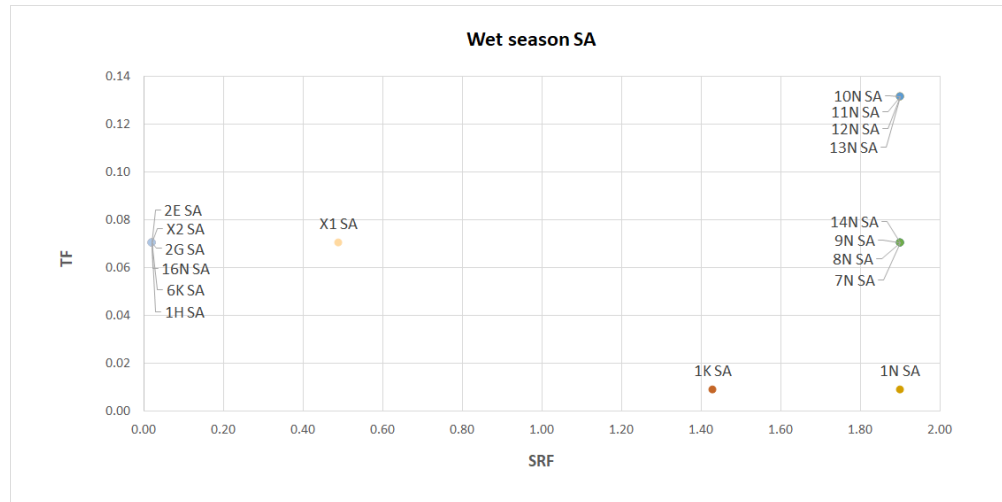


Figura 7.15: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006.

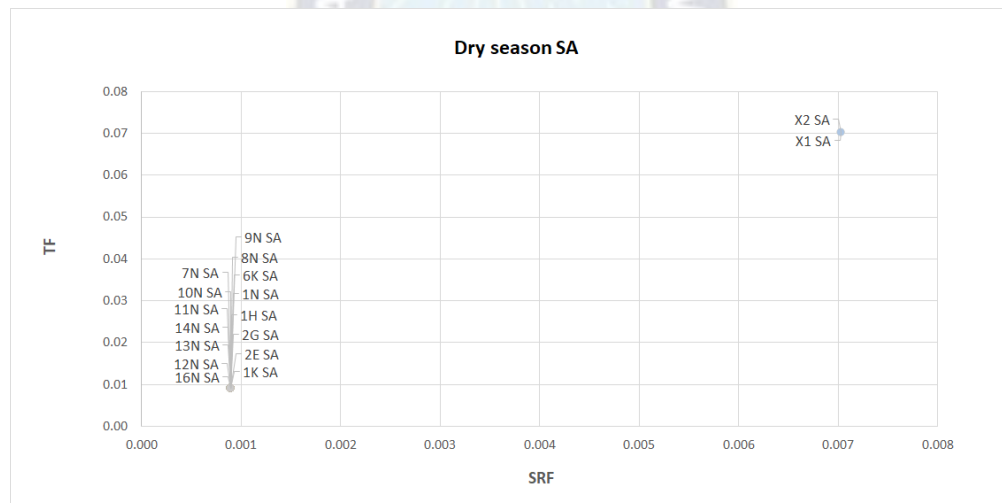


Figura 7.16: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006.



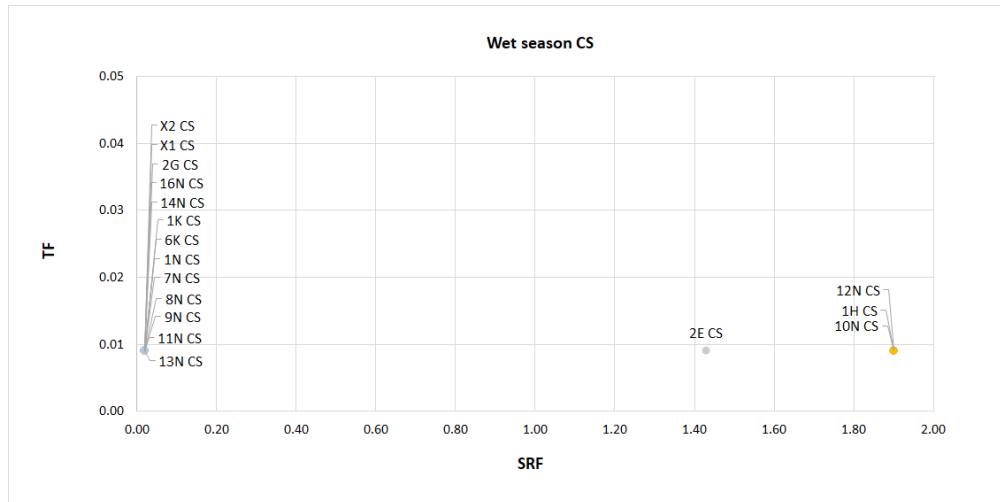


Figura 7.17: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006.

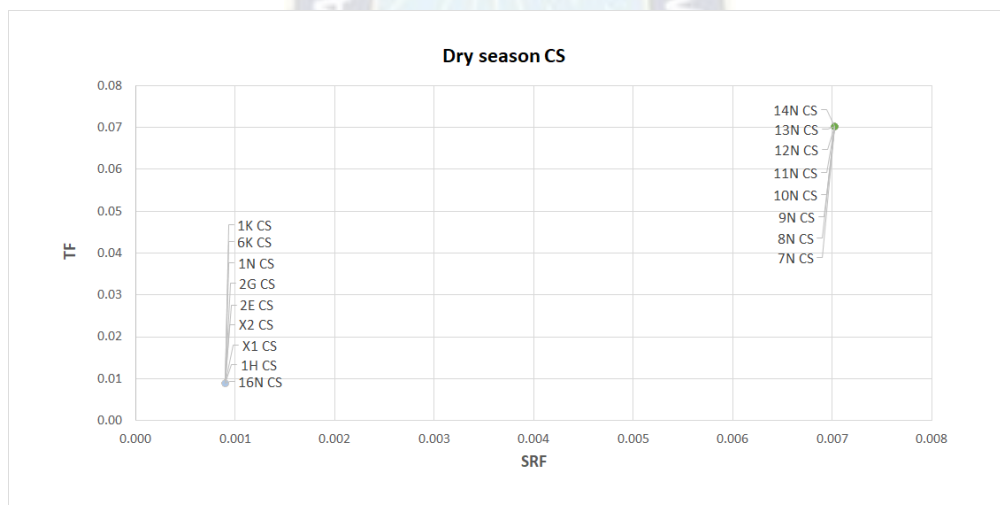


Figura 7.18: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006.

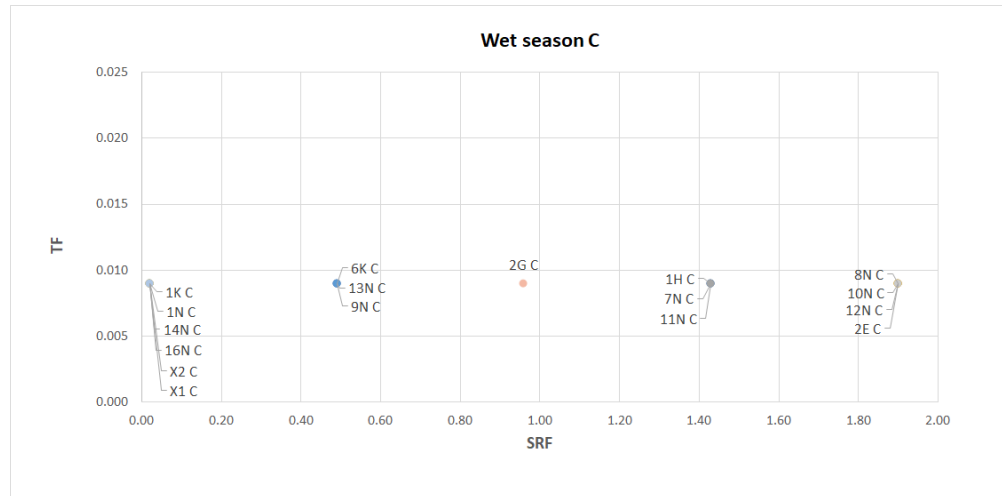


Figura 7.19: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada húmeda durante el periodo 2005-2006.

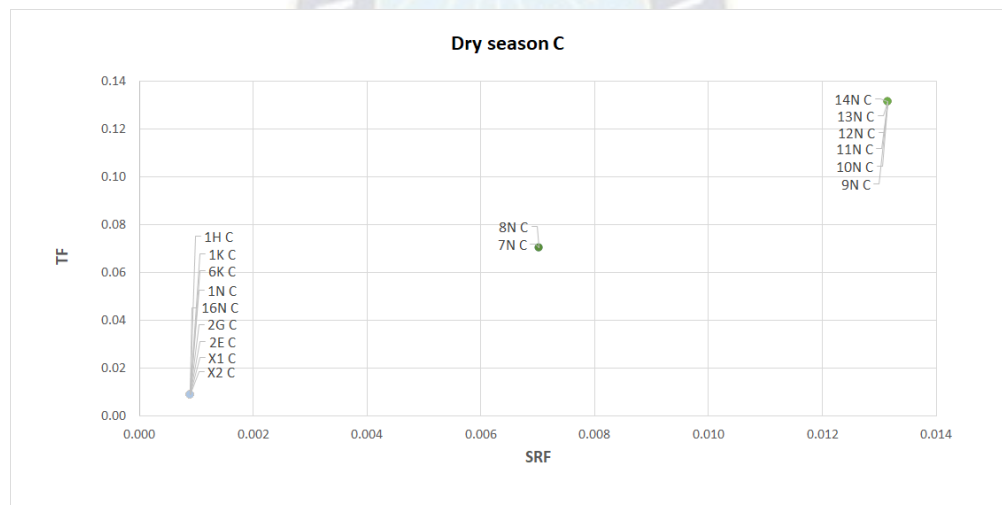


Figura 7.20: Valores calibrados de TF ( $mm \text{ dia}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ) y SRF ( $mm \text{ dia}^{-1} m^2 W^{-1}$ ) en 17 estacas para la temporada seca durante el periodo 2005-2006.

Otro resultado muy interesante es que la incorporación de los algoritmos de cálculo de la radiación mejoran las estimaciones de TF y SRF, ya que se tienen valores calibrados más similares entre estacas, es decir con menor variabilidad que la que se tiene cuando no se considera este algoritmo.

En el glaciar Zongo, la radiación solar aumenta a su valor máximo anual y la radiación de onda corta neta proporciona la mayoría de la energía de derretimiento en la estación húmeda .

### 7.1.1. Evaluación del modelo de derretimiento ETI en el glaciar Zongo.

Esta sección muestra los resultados de la aplicación del modelo de índice de temperatura mejorado (ETI). Utilizando la información de la sección 7.1 y la calibración de los parámetros en la sección 7.1, se realizó el cálculo del derretimiento con el modelo ETI y se obtuvieron los siguientes resultados.

En las Figuras 7.21, 7.22, 7.23, 7.24, 7.25 y 7.26 se muestran los resultados para seis estacas representativas de acuerdo a su elevación, mejor ajuste entre el balance de masa acumulado observado y el balance de masa calculado por el modelo ETI, y los valores obtenidos del error absoluto medio MAE que fueron menores en comparación a las otras estacas situadas al rededor de las estacas representativas ver ANEXOS A.4. En las Tablas 7.6 y 7.7 se muestran el error absoluto medio MAE y el sesgo (bias) para todas las estacas.

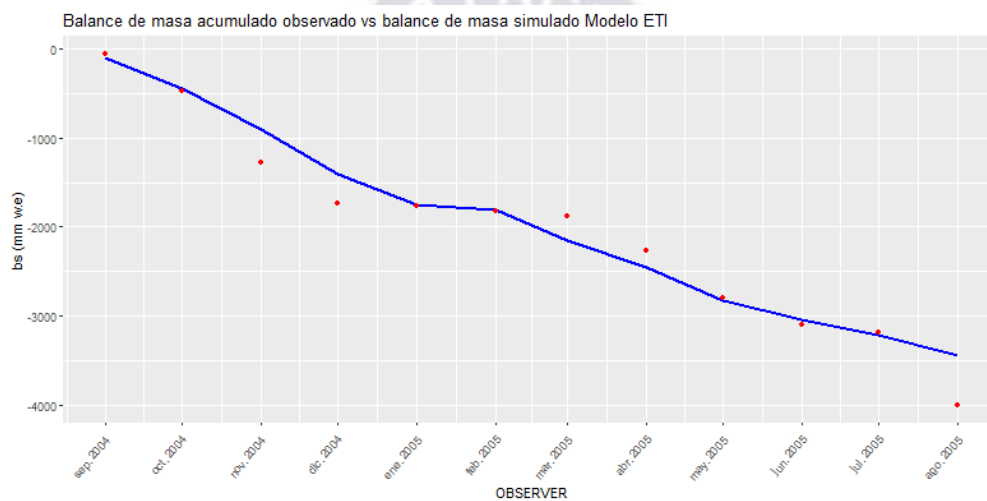


Figura 7.21: Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 2G ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2004–2005.

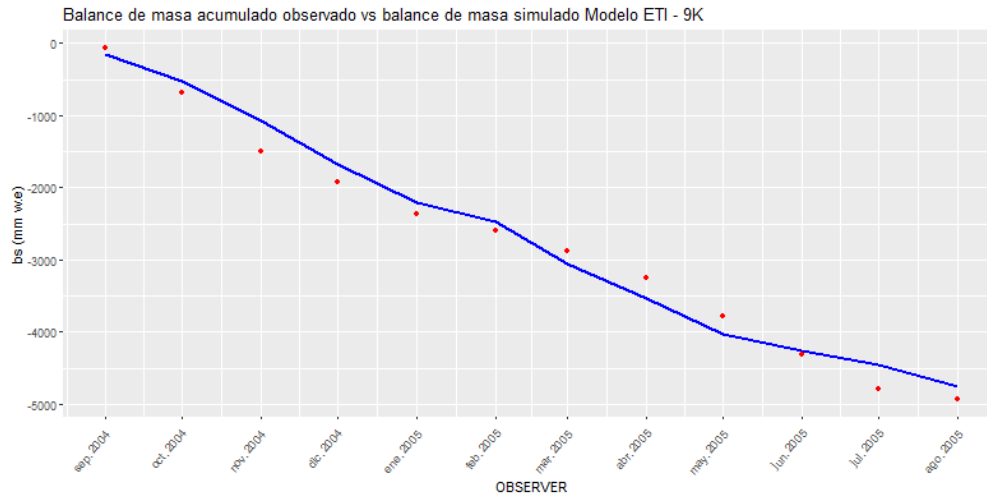


Figura 7.22: Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 9K ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2004–2005.

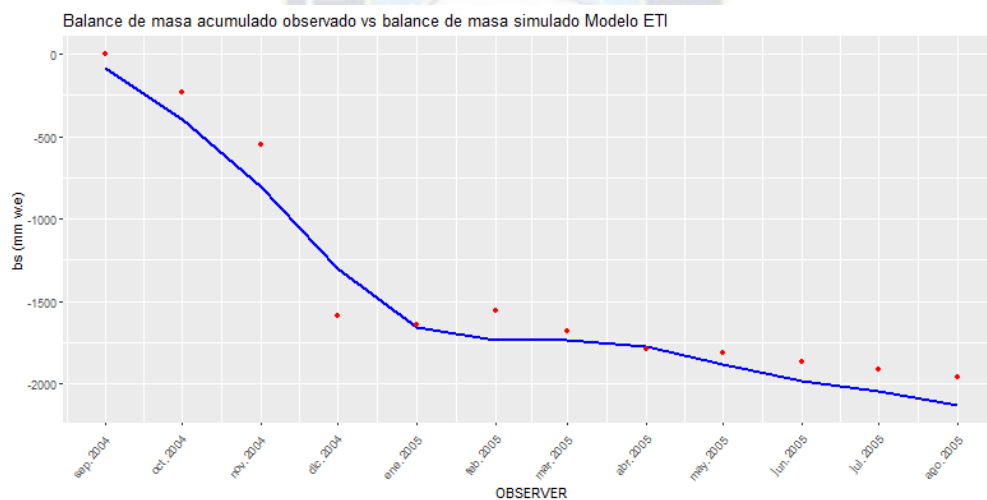


Figura 7.23: Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca X1 ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2004–2005.

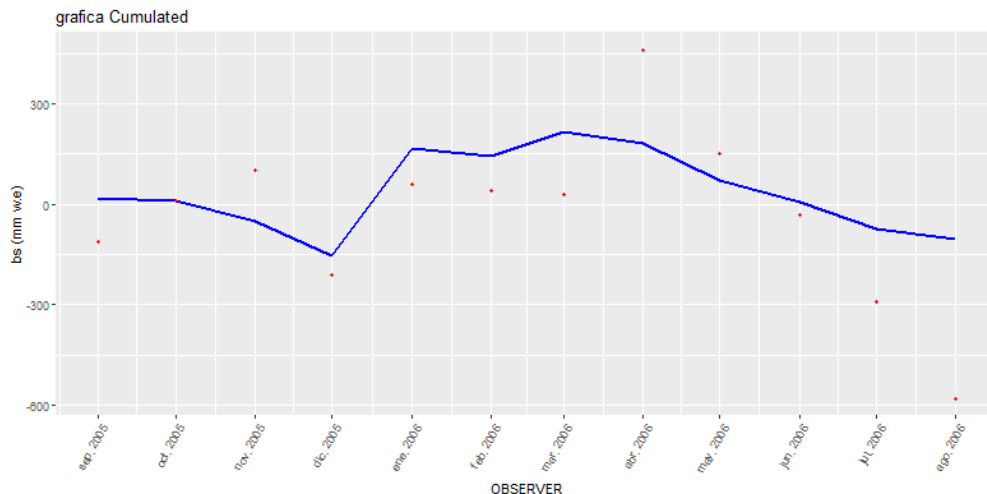


Figura 7.24: Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 16N ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2005–2006.

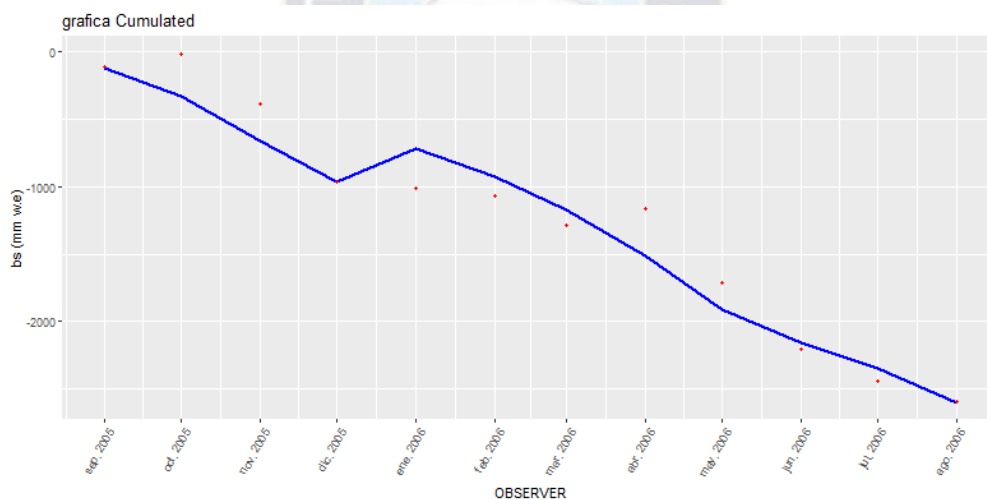


Figura 7.25: Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 7N ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2005–2006.

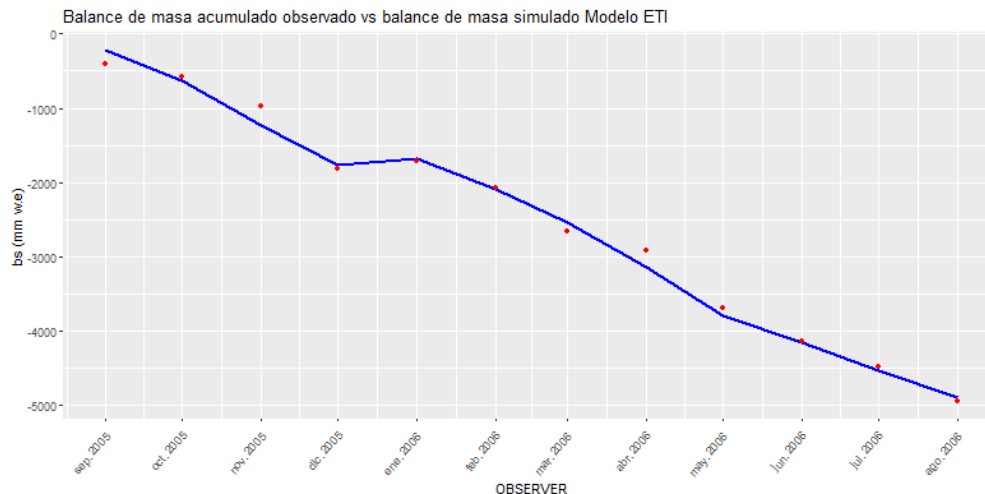


Figura 7.26: Balance de masa acumulado observado (puntos rojos) y balance de masa simulado por el modelo ETI (línea azul) a nivel mensual con parámetros calibrados para la estaca 10N ubicada en la zona de ablación, para los años hidrológicos 2005–2006.

ETI para los dos años hidrológicos 2004-2005 con parámetros calibrados se desempeñó mejor obteniendo mejores ajustes entre el balance de masa acumulado observado y simulado, en todas sus estacas. El error absoluto medio MAE que obtuvieron alcanzó hasta  $1.650 \text{ mm dia}^{-1}$  como el error más alto entre las estacas. Así mismo para los años 2005-2006 los mejores ajustes se obtuvieron en la parte baja del glaciar (por ejemplo, estacas 7N, 8N, 9N, 10N, 11N, 12N, 13N, 14N) y su MAE osciló entre  $0.758$  a  $2.625 \text{ mm dia}^{-1}$ . Las restantes estacas obtuvieron un pobre ajuste entre el balance de masa mensual acumulado observado y simulado, sin embargo los valores en MAE fueron menores a  $0.265 \text{ mm dia}^{-1}$ .

### 7.1.2. Evaluación del Modelo de derretimiento SETI en el glaciar Zongo.

Se muestran los resultados de la aplicación del modelo de Índice de Temperatura Mejorado para Superficies de relieve accidentado y complejo (SETI). Se usó los datos de entrada de la sección 7.1, exceptuando los valores de la radiación Global  $G$  (direct + diffuse = Radiación de onda corta entrante) de la estación en el glaciar Zongo, que fueron modelados a través del algoritmo presentado en capítulos anteriores.

Se usó el Raster generado de la variación de radiación solar para cuantificar los efectos del sombreado topográfico en el glaciar “Impactos del sombreado topográfico en la radiación solar directa para glaciares de valle con topografía compleja” de Olson and Rupper (2019), con este estudio se realizó un nuevo enfoque al incorporar un nuevo factor que considere el sombreado topográfico que altera significativamente la radiación solar incidente en la superficie del glaciar, como un factor importante en la obtención de los resultados del balance de masa a paso mensual.

Olson and Rupper (2019) realizaron un paquete en el lenguaje de programación R (“Toposol Functions, Toposol Main y Toposol Variables”), que calcula la posible radiación solar de cielo despejado como se muestra en el Capítulo 6, sección 6.4 que considera el cambio medio en la irradiancia solar debido a los factores topográficos siguientes: la pendiente y el aspecto, relieve sombreado,

sombras proyectadas y todos los efectos topográficos combinados de las anteriores ya mencionados. Para hacer correr el modelo topográfico “Toposol” realizado por [Olson and Rupper \(2019\)](#) se utilizó como dato de entrada un modelo de elevación digital DEM de 30 metros de resolución para representar la forma del terreno.

Para que el algoritmo pueda realizar los cálculos el DEM (debería estar en coordenadas geográficas y formato RASTER) de una extensión que considere mínimamente 5 km o adicionales al shape de la cuenca glaciaria (para el efecto sombreado circundante del glaciar). [Olson and Rupper \(2019\)](#) considera que mientras las elevaciones de los glaciares sean más altas, el horizonte visible puede hacerse mucho más grande, en cuyo caso la extensión debe incorporar características topográficas dentro de la visibilidad. Sin embargo se consideró que tomando una extensión no menor a cinco km alrededor del glaciar en el DEM resultó ser suficiente al aplicar Toposol.

Los valores obtenidos en los cambios de radiación solar directa que consideran la pendiente y el aspecto, relieve sombreado, sombras proyectadas y el efecto combinado de las anteriores mencionados, se obtuvieron para cada estaca considerando su elevación y mes de estudio, es decir se calculan valores diarios del cambio de radiación solar directa que consideran los parámetros topográficos mencionados en este estudio en base a la latitud, ángulo horario, cenit (Z) los cuales son calculados usando los métodos estándar de [Iqbal \(1983\)](#) para cada mes y altura de cada estaca para los dos años hidrológicos 2004-2006. Para poder usar estos valores que consideran el sombreado topográfico en nuestro modelo SETI, se adicionó a la radiación global G que fue medida por la estación AWS en el glaciar Zongo para que pueda considerar estos aspectos topográficos en el estudio. Por lo tanto se tiene:

$$G_m = G_{global} + (I_{SR} + I_{SA} + I_{CS} + I_C) \quad (7.1)$$

Donde,  $G_m$  es la radiación global mejorada,  $G_{global}$  es la radiación global medida por la estación automática de temperatura AWS en el glaciar, ( $I_{SR}$ ,  $I_{SA}$ ,  $I_{CS}$ ,  $I_C$ ) muestran el cambio medio de la irradiancia solar debido al relieve sombreado, pendiente, aspecto, sombras proyectadas y el combinado de todas las mencionadas respectivamente.

Una vez obtenidos los nuevos valores de radiación global mejorado que considera también el cambio medio de la irradiancia debido a la pendiente y el aspecto, relieve sombreado, sombras proyectadas y el efecto combinado de las anteriores mencionados, calculamos la fusión con el modelo SETI, cuya formulación es:

$$M = \begin{cases} TF * T + SRF * (1 - \alpha) * G_m & T > T_T \\ 0 & T \leq T_T \end{cases} \quad (7.2)$$

Donde  $\alpha$  es albedo y  $G_m$  ( $W m^{-2}$ ) es la radiación global mejorado que considera los efectos del sombreado en la topografía en el glaciar.  $TF$  ( $mm \text{ } ^\circ C^{-1} dia^{-1}$ ) y  $SRF$  ( $mm m^2 W^{-1} dia^{-1}$ ) son los coeficientes empíricos, el factor de temperatura y el factor de radiación de onda corta respectivamente. Estos valores fueron calibrados en la sección [7.1](#).

En las Figuras [7.31](#), [7.32](#), [7.33](#) y [7.34](#) se muestran los resultados para dos estacas representativas para el año 2004-2005, fueron seleccionadas de acuerdo al mejor ajuste entre el balance de masa mensual acumulado observado y el balance de masa simulado por el modelo SETI, y los menores valores que se obtuvieron del error absoluto medio MAE. En la Tabla [7.8](#) se muestran el error absoluto medio MAE y el sesgo (bias). Las estacas 6K, 2G, X1 presentan valores bajos de MAE para los casos de SR, SA, CS y C al incorporar estos factores en el balance de masa en comparación a

las demás estacas. A su vez presentaron un buen ajuste entre el balance de masa acumulado observado y el balance de masa simulado por el modelo SETI, pero sobre todo en relieve sombreado SR. En las estacas 9K, 10K, 11K, 12K y 4F presentan valores de MAE considerablemente altos con respecto a las otras estacas que se sitúan en el glaciar, pero presentaron un buen ajuste entre el balance de masa acumulado observado y el balance de masa simulado por el modelo SETI.

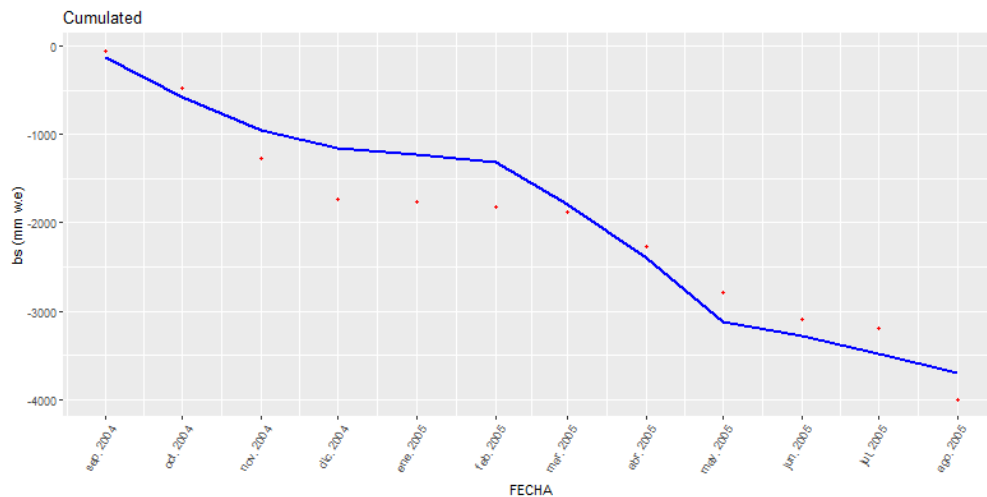


Figura 7.27: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005.

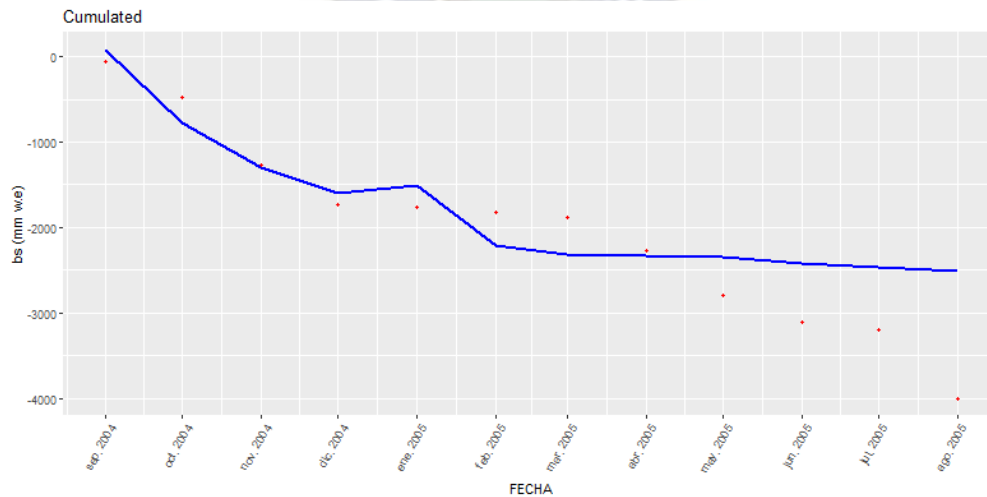


Figura 7.28: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005.



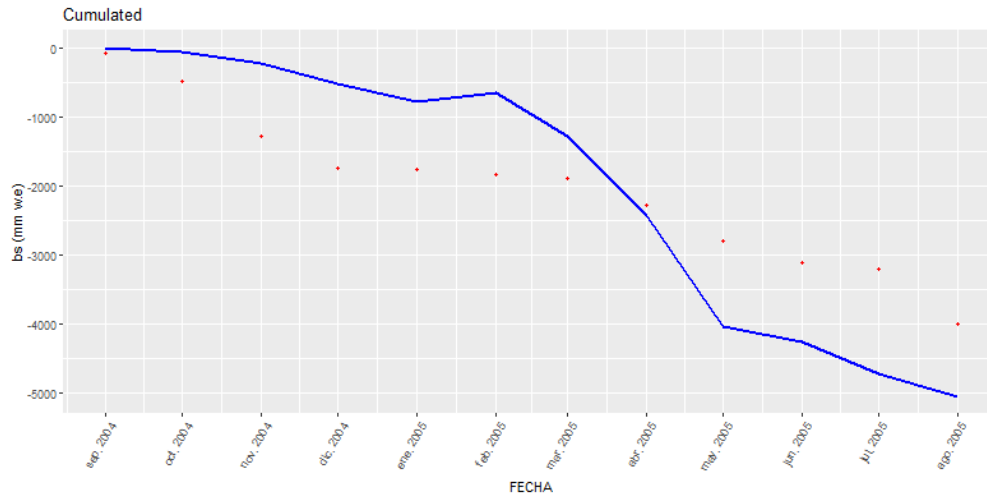


Figura 7.29: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005.

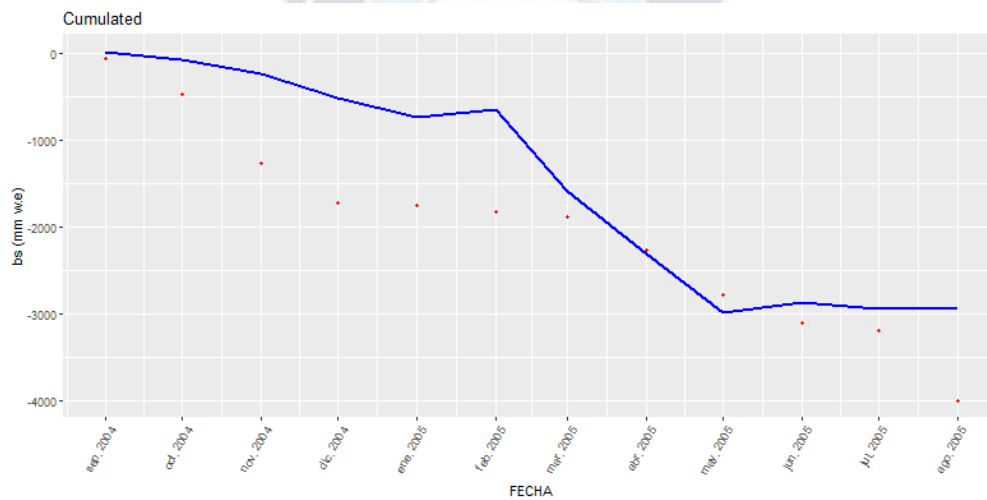


Figura 7.30: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005.

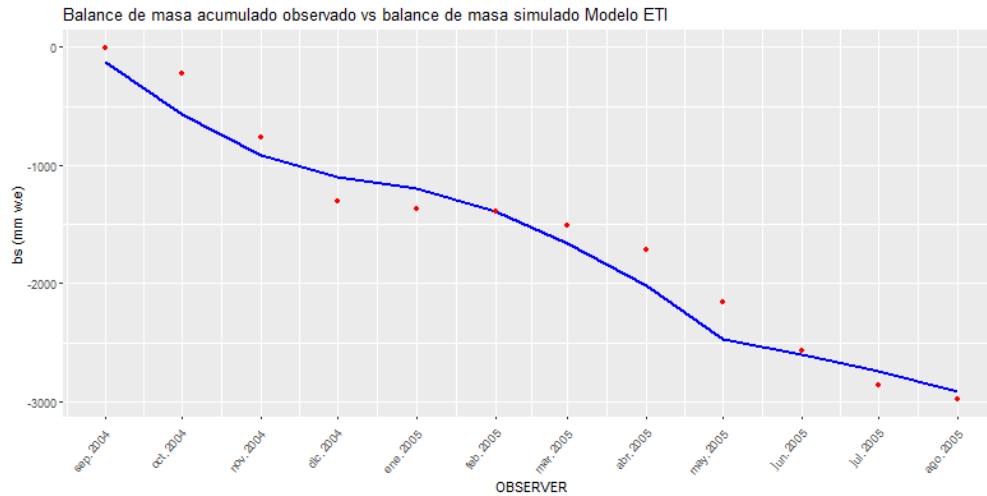


Figura 7.31: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005.

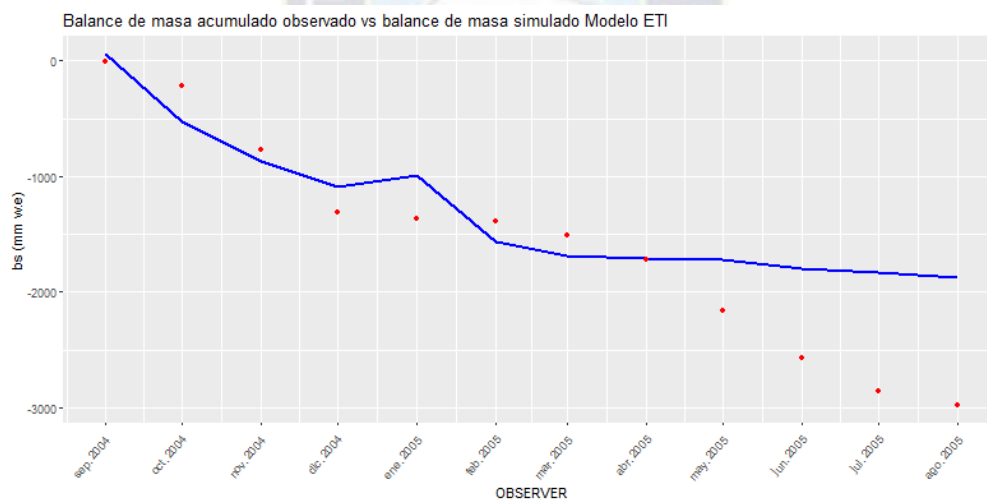


Figura 7.32: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005.

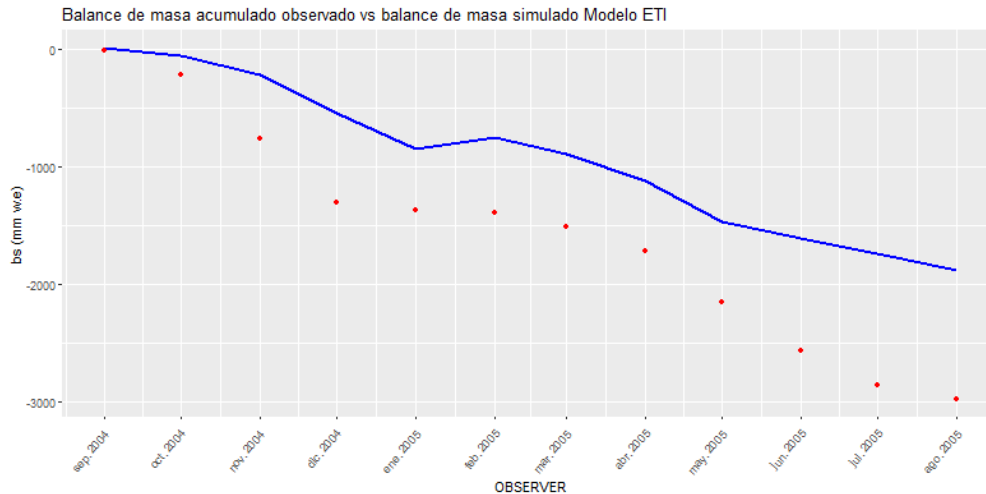


Figura 7.33: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005.

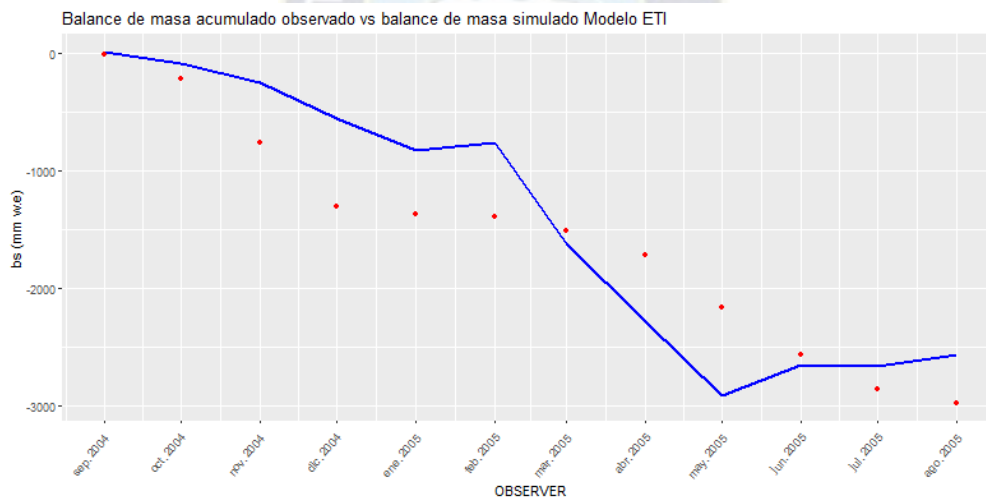


Figura 7.34: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005.

Así mismo las Figuras 7.35, 7.36, 7.37 y 7.38 se muestran los resultados para una estaca representativa para el año 2005-2006, fue seleccionada de acuerdo al mejor ajuste entre el balance de masa acumulado observado a nivel mensual y el simulado por el modelo SETI, y los menores valores que se obtuvieron del error absoluto medio MAE. A su vez las Figuras 7.39, 7.40, 7.41 y 7.42 muestran los resultados para una estaca representativa con valores altos en el error absoluto medio MAE con relación a las demás estacas pero esta estaca presenta un mejor ajuste entre el balance de masa acumulado observado a nivel mensual y el simulado por el modelo SETI. En la

Tabla 7.9 se muestra el error absoluto medio MAE y el sesgo (bias) para todas las estacas en el glaciar para el año 2005-2006.

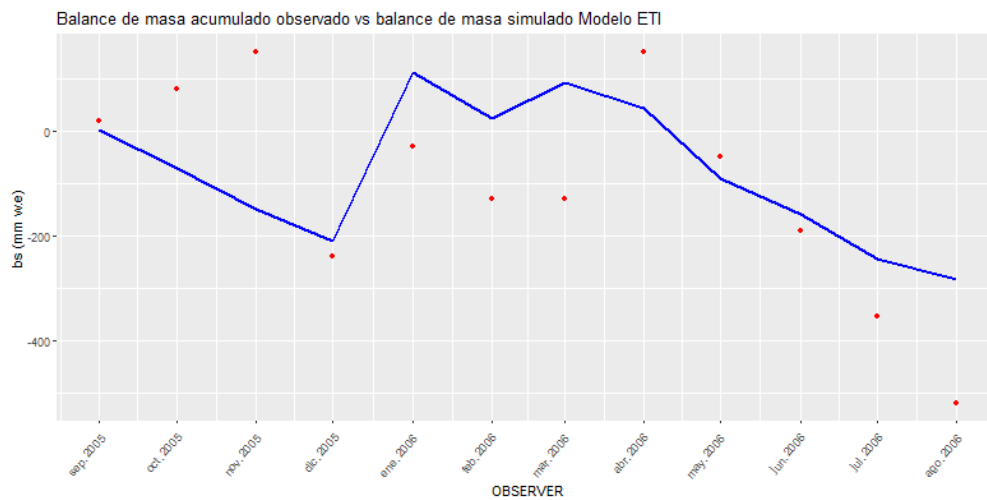


Figura 7.35: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2005-2006.

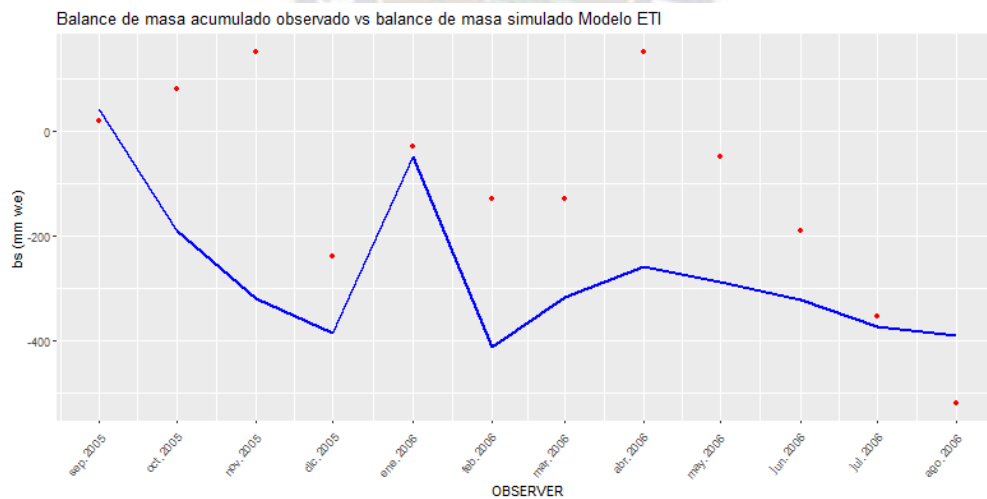


Figura 7.36: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2005-2006.

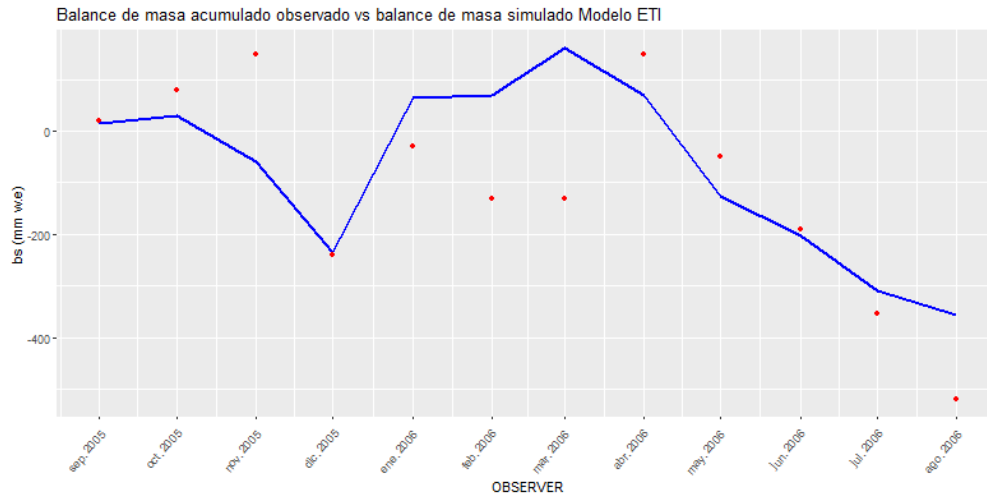


Figura 7.37: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2005-2006.

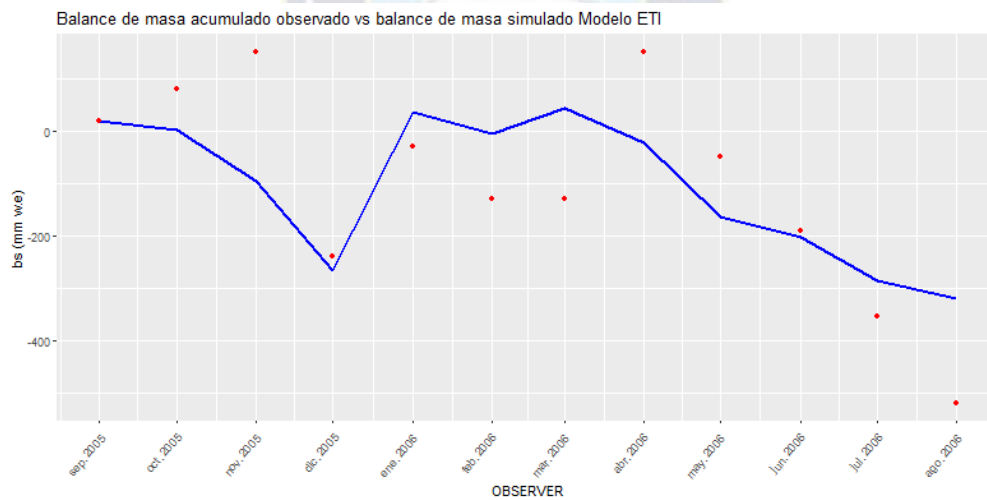


Figura 7.38: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2005-2006.

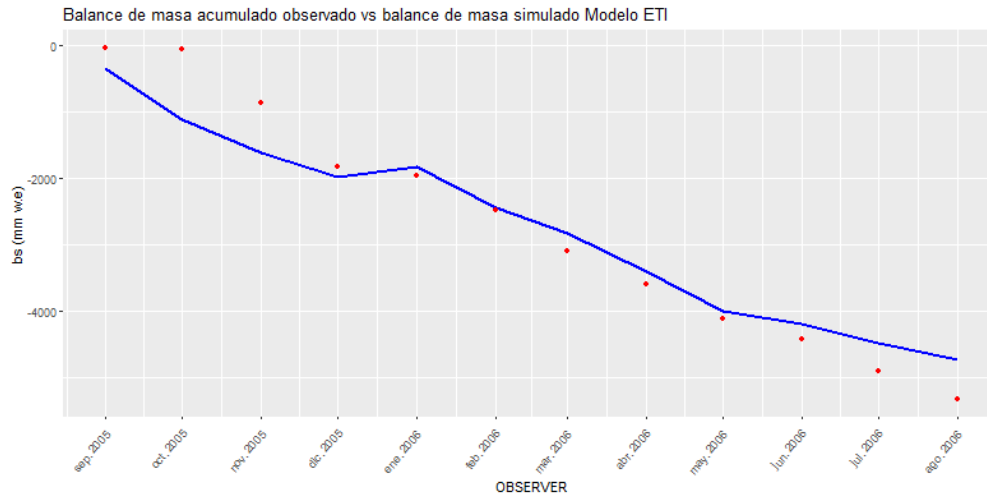


Figura 7.39: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 13N durante el periodo 2005-2006.

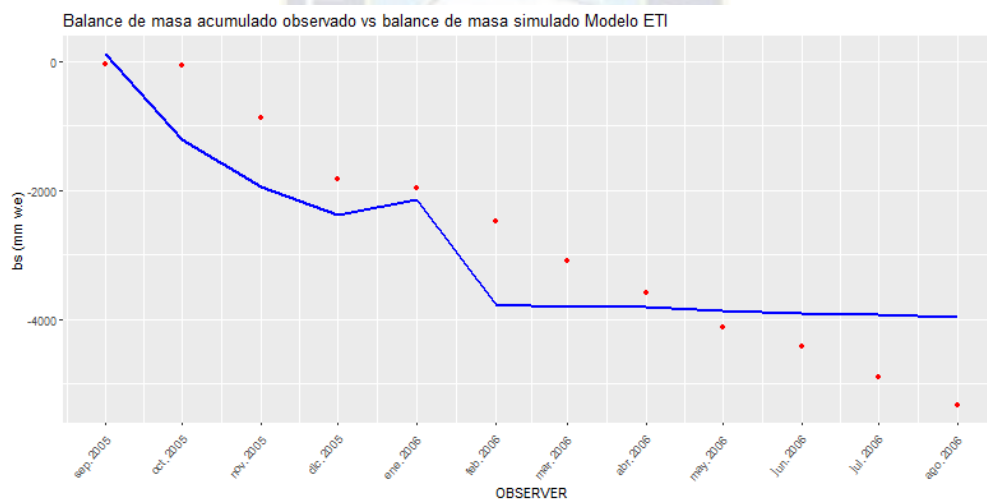


Figura 7.40: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 13N durante el periodo 2005-2006.

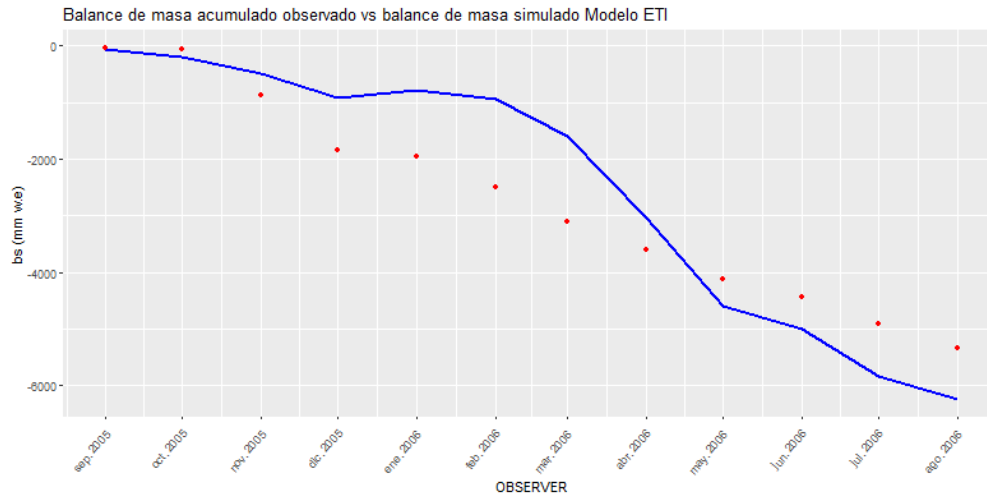


Figura 7.41: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 13N durante el periodo 2005-2006.

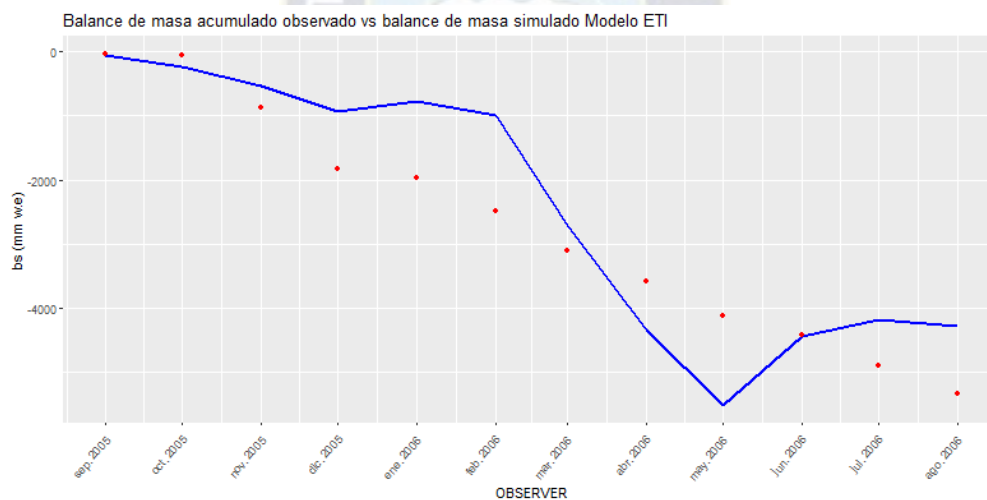


Figura 7.42: Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 13N durante el periodo 2005-2006.

La estaca 2G presenta valores bajos del error absoluto medio MAE y un considerable ajuste entre el balance de masa mensual acumulado observado y el simulado. Por su parte la estaca 13N presenta valores elevados de MAE con respecto a las demás estacas y un mejor ajuste entre el balance de masa mensual acumulado observado y el simulado para el año 2005-2006.

Del mismo modo las estacas 1H, 1K, 6K, 1N, 16N, 2G, 2E, X1 y X2 presentan bajos valores de MAE para los casos de SR, SA, CS y C al incorporar estos factores en el balance de masa. A su vez presentaron un buen ajuste entre el balance de masa acumulado observado y el balance de masa

simulado por el modelo SETI, pero sobre todo en en relieve sombreado SR. En las restantes estacas 7N, 8N, 9N,10N, 11N, 12N, 13N y 14N presentan valores de MAE considerablemente altos con respecto a las otras estacas valores que alcanzan hasta  $6.05 \text{ mm dia}^{-1}$ , pero presentaron un buen ajuste entre el balance de masa mensual acumulado observado y simulado por el modelo SETI para los años 2005-2006. Estos resultados se adjuntan en ANEXOS A.4.





## 7.2. Análisis de resultados

### 7.2.1. Comparación de modelos SETI y ETI vs. datos observados

En base a los resultados hallados de los modelos recién descritos durante los periodos de estudio 2004-2005 y 2005-2006 (dos años hidrológicos) y utilizando 25 estacas en el glaciar Zongo. Es importante analizar la incidencia al incorporar un nuevo factor en el modelo ETI que considere el sombreado topográfico en la superficie del glaciar. Para hacer que los dos modelos sean comparables, se utilizaron los mismos parámetros básicos (TF y SRF) y datos de entrada de la sección [7.1](#).

La Figura [7.43](#) muestra la eficiencia del modelo SETI con respecto al error absoluto medio MAE para seis estacas que se encuentran ubicadas en elevaciones  $> 5100$  m s.n.m en el glaciar Zongo, la mayoría de las estacas que se encuentran a elevaciones mayores a 5100 m s.n.m. (X1, X2, 16N, 1H, 2G y 6K en la zona de ablación alta) con relación a las demás estacas presentan menores valores de MAE. Es decir que se encontró una disminución en los errores en MAE (error absoluto medio) con relación al modelo ETI y mejores ajustes en los balances de masa mensual acumulado observado y simulado. Para el relieve sombreado SR la mayoría de las estacas presentan menores valores de MAE y mejores ajustes. Sin embargo para algunas estacas presentan menores valores de MAE y mejores ajustes para la pendiente y aspecto SA y el combinado de los factores topográficos C. En la Figura [7.43](#) se muestran los menores valores de MAE SETI para cada estaca y se compara con los valores de MAE ETI. Se realizó una diferencia llamada COMP (comparación) entre el MAE ETI menos el menor valor de MAE SETI y el resultado obtenido es el que decide si se considera la eficiencia del modelo SETI, es decir si obtenemos un valor positivo de la diferencia eso quiere decir que el error de MAE SETI es menor al MAE ETI pero si obtenemos un valor negativo de la diferencia esto significa que el MAE de SETI es mayor al MAE de ETI. Los puntos verdes en la figura (valores positivos de MAE ) representan y una eficiencia del modelo SETI con relación al modelo ETI, en cambio los puntos rojos, naranjas y amarillos (valores negativos de MAE) representan lo contrario, esto quiere decir que los valores de MAE SETI son mayores a los errores MAE de ETI. Este análisis se considero para los años 2004-2006 sin embargo para el año 2004 - 2005 se puede observar que el MAE de SETI no mejora, es decir que sus valores no son menores al de MAE de ETI.

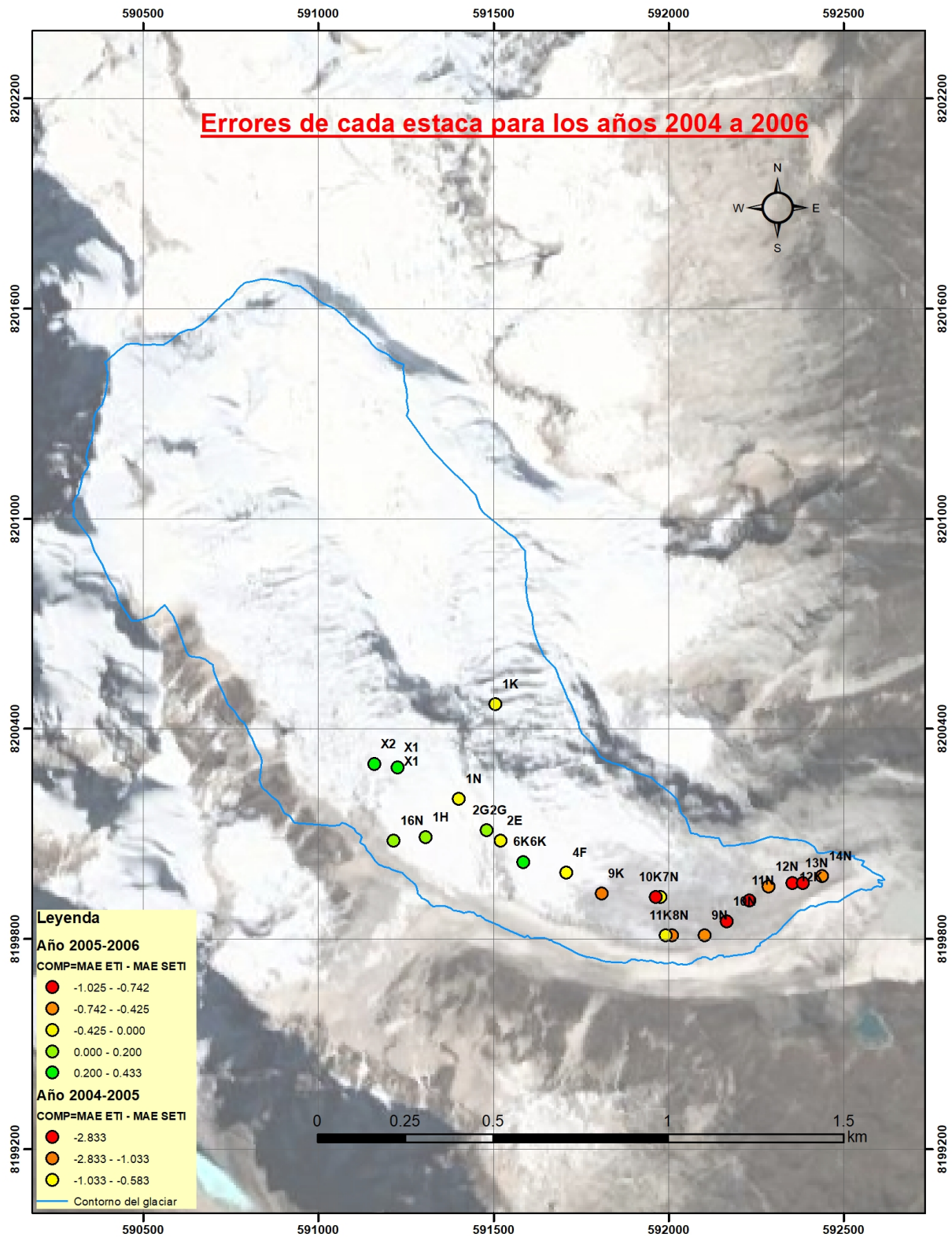


Figura 7.43: Eficiencia del modelo SETI para las estacas en el glaciar Zongo para los años 2004-2006.

Las estacas de menor elevación (< 5100m s.n.m.) se encuentran en la parte baja de la zona de ablación en el glaciar, obtuvieron ajustes similares con respecto a las salidas de simulación del modelo ETI para el caso del relieve sombreado (SR). Por su parte para CS, SA y C presentan una diferencia entre el balance de masa observado acumulado y simulado considerablemente. Esto se debe sobre todo al cambio medio en la irradiancia para los parámetros topográficos. La Figura 7.44 muestra como cambia la irradiancia a lo largo de la elevación en el glaciar considerando los diferentes factores topográficos. Se eligió una estaca representativa dentro de las que presentan una mejora al incorporar estos factores topográficos como se indica en la Figura 7.43. Se eligió el mes de mayo debido a la baja presencia de nubes en el cielo lo que hace que se presente mayores valores de radiación solar directa en la temporada seca en comparación a la temporada húmeda. Para nuestro estudio no se considera el efecto de las nubes en el cielo en la temporada húmeda pero se recomienda considerar este efecto para estudios posteriores.

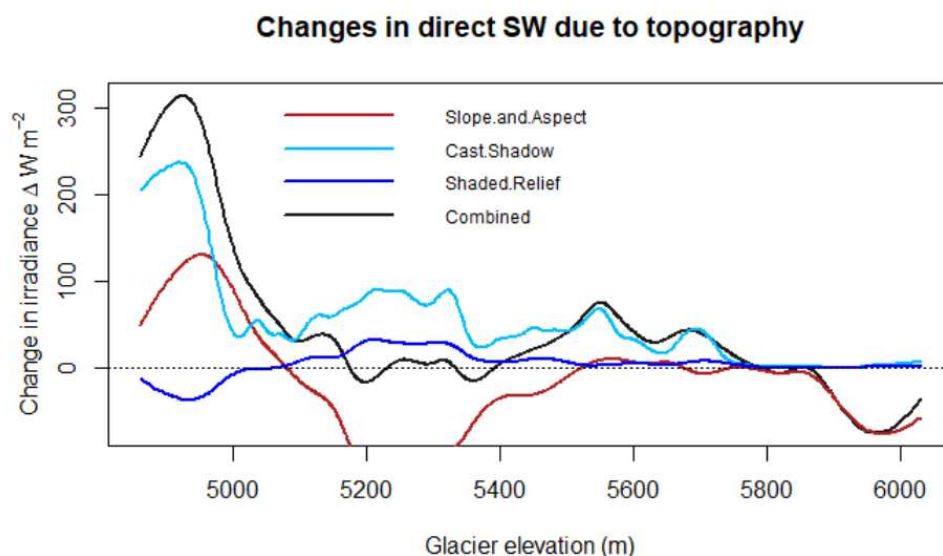


Figura 7.44: Cambio medio en la irradiancia debido al relieve sombreado (SR), sombras proyectadas (CS), pendiente y aspecto (SA) y la combinación de los parámetros topográficos (C), para el mes de mayo del año 2006 elaborado a través del código Toposol para la estaca 1H con elevación 5186 m s.n.m. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7.45 muestra en balance de masa mensual de la estaca 1H con el modelo ETI y las Figuras 7.46, 7.47, 7.48 y 7.49 muestran el balance de masa mensual con el modelo SETI para el año 2005-2006. En estas Figuras se muestra como el efecto del sombreado topográfico incide en el balance de masa mensual.

La Figura 7.46 para la estaca 1H muestra cómo el mes de mayo es afectado por el relieve sombreado SR lo que hace que se acerque más al valor de balance de masa observado acumulado a nivel mensual de mm w.e., lo mismo ocurre para las sombras proyectadas CS Figura 7.48 y el

combinado de los factores topográficos C Figura 7.49. Sin embargo para la pendiente y aspecto Figura 7.47 no incrementa el valor del balance de masa para el mes de mayo, esto significa que no hubo mucha influencia del cambio de irradiancia que considera la pendiente y aspecto en esa estaca lo cual obtuvo valores menores, que al ser sumados a la radiación global no produjeron una disminución o incremento significativo en su valor por esta razón no se presenta un cambio en el mes de mayo de mm w.e. para el modelo SETI.

Para el mes de Mayo de 2006 el balance de masa mensual observado es de -60 mm w.e. Del mismo modo para el modelo ETI presenta un valor de -212 mm w.e. Figura 7.45, y para el modelo SETI un valor igual a -161 mm w.e. Figura 7.46. El valor para el mes de mayo del modelo SETI que considera el relieve sombreado SR, se acerca más al valor observado del mes de mayo, pero presenta un MAE considerablemente mayor al MAE del modelo ETI. Del mismo modo para el combinado de los factores topográficos C Figura 7.49, presenta un mejor ajuste entre el valor del balance de masa mensual observado y el simulado dando un valor igual a -66 mm w.e. para el mes de mayo, este valor se acerca al valor de -60 mm w.e. del balance de masa observado en comparación al modelo ETI que tiene un valor de -212 mm w.e. A su vez el modelo SETI que considera la combinación de los factores topográficos genera un menor valor de MAE con respecto al MAE del modelo ETI.

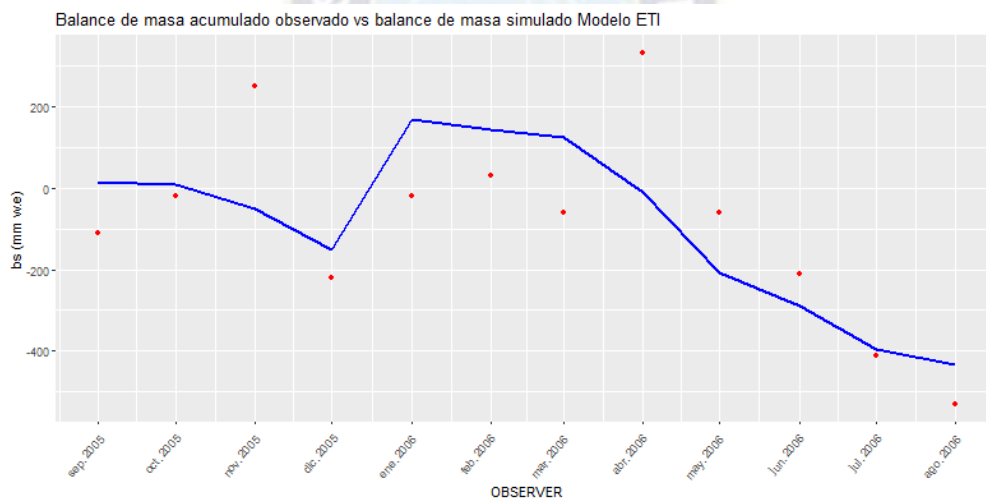


Figura 7.45: Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado ETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo ETI. Para los años 2005-2006.

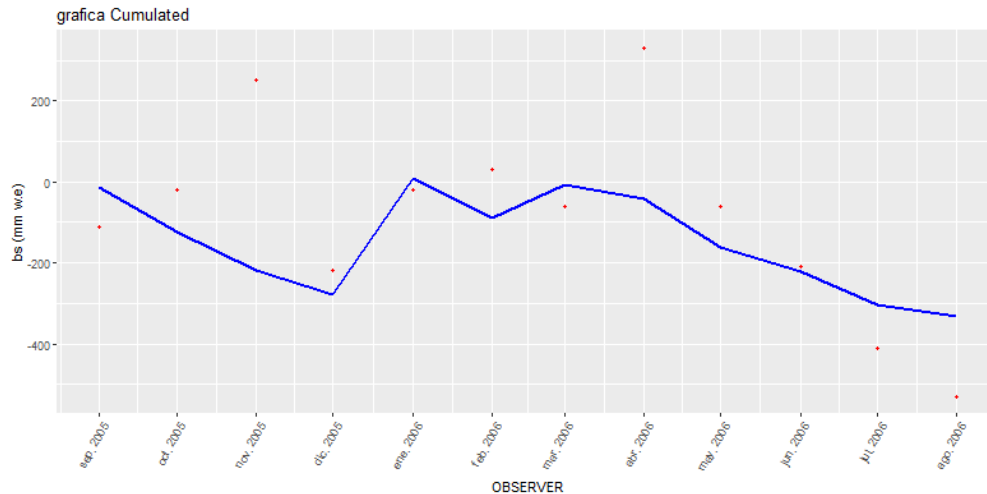


Figura 7.46: Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo SETI, considerando el relieve sombreado (SR) en el glaciar. Para los años 2005-2006.

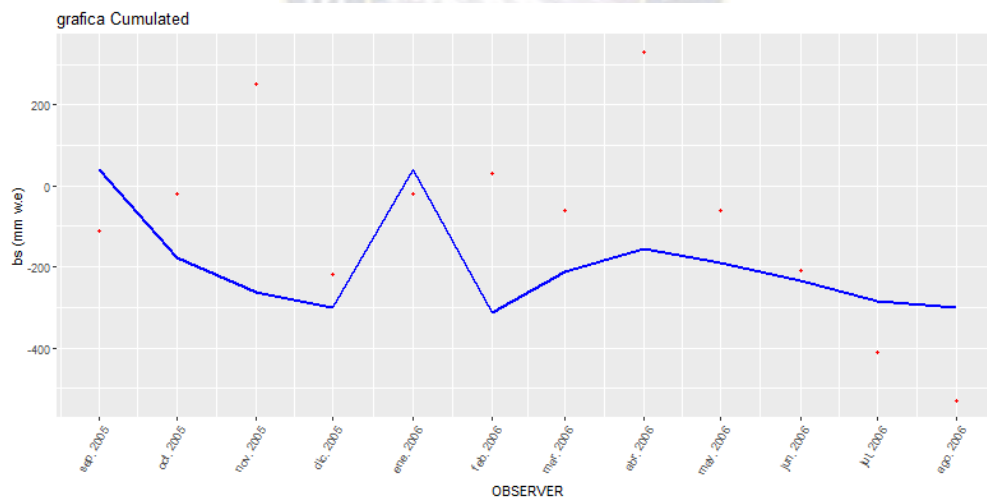


Figura 7.47: Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo SETI, considerando la pendiente y aspecto (SA) en el glaciar. Para los años 2005-2006.

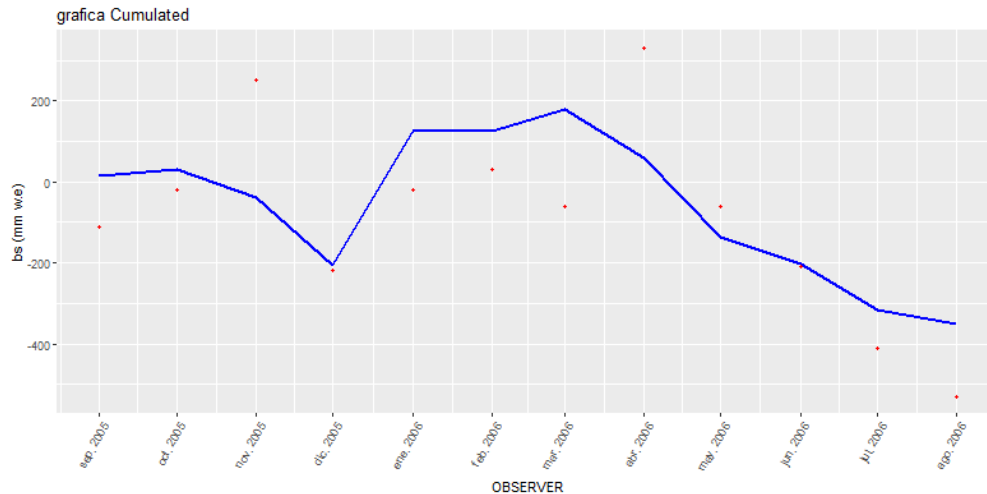


Figura 7.48: Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo SETI, considerando las sombras proyectadas (CS) en el glaciar. Para los años 2005-2006.

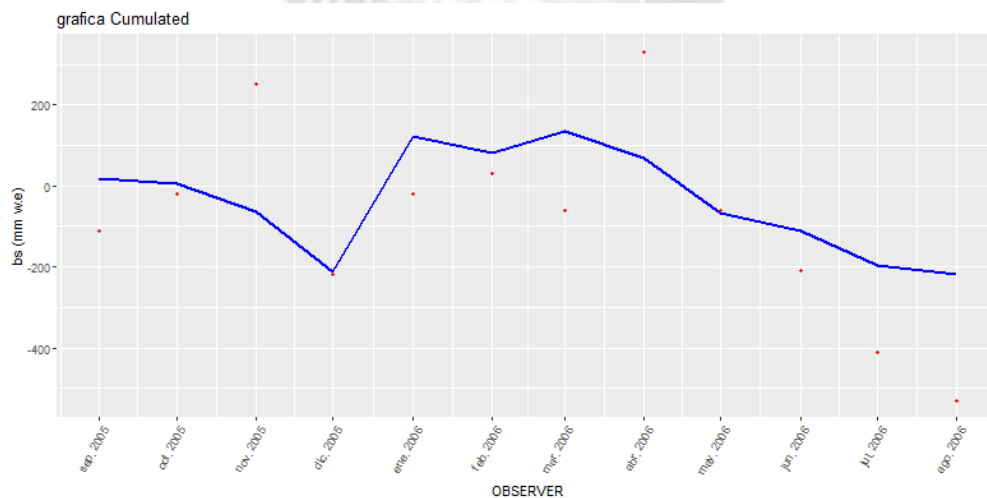


Figura 7.49: Balance de masa mensual con el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para la estaca 1H. Los puntos rojos significan el balance de masa observado acumulado y la línea azul es la simulación del modelo SETI, considerando el combinado de los factores de sombreado topograficos (C) en el glaciar. Para los años 2005-2006.

Finalmente presentamos las Figuras 7.50 y 7.51 muestran los rangos de los parámetros “factor de temperatura (TF)” y “factor de radiación de onda corta (SRF)” que se utilizaron como condiciones de borde al realizar la calibración de TF y SRF para los modelos ETI y SETI como se

muestran en la sección 7.1. Para los modelos ETI y SETI se considero distintas temporadas (húmeda y seca), debido a la variabilidad climática que presenta el glaciar Zongo, en comparación a los glaciares que se muestran en las Figuras 7.50 y 7.51 que consideran valores de TF y SRF para todo el año debido a su características climáticas.

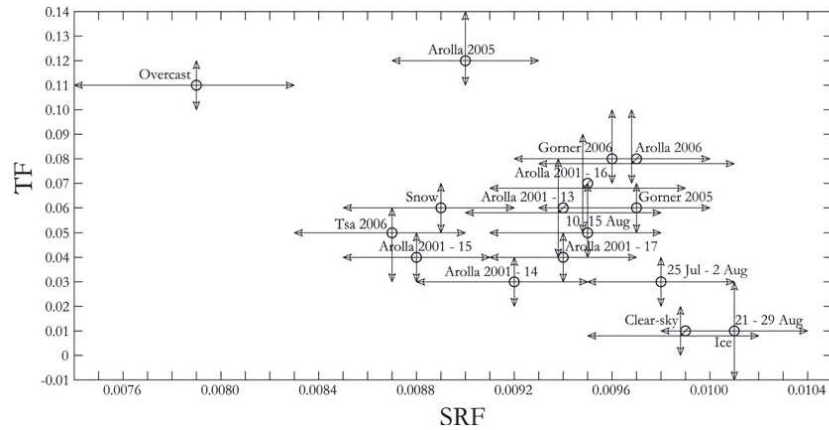


Figura 7.50: Valores óptimos de TF y SRF en el espacio de parámetros para los sitios de estudio y temporadas examinadas en el estudio de Carenzo et al. (2009). TF y SRF se expresan en  $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{h}^{-1}$  y  $\text{mm } \text{m}^2\text{W}^{-1}\text{h}^{-1}$ , respectivamente. Fuente: Carenzo et al. (2009)

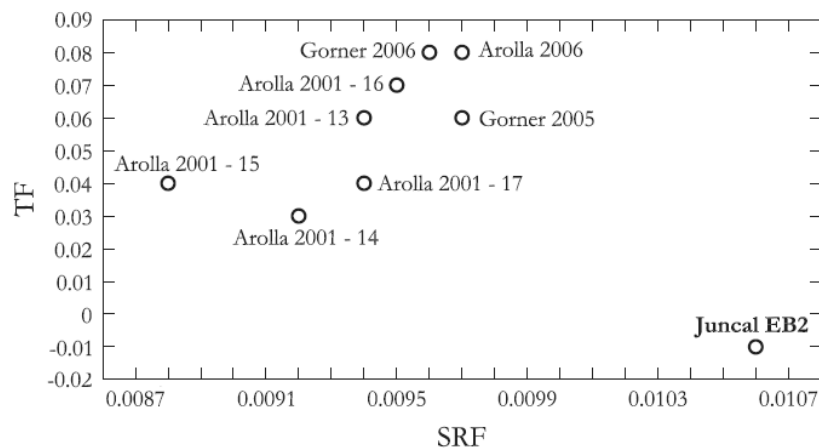


Figura 7.51: Valores óptimos de TF y SRF en el espacio de los parámetros para el Glaciar Juncal Norte y para los sitios de estudio y temporadas examinados para los Alpes europeos. Las etiquetas “Arolla” y “Gorner” indican Haut Glacier d’Arolla y Gornergletscher, respectivamente. Los números junto a Arolla designan diferentes AWS (ver Pellicciotti et al. (2008) para una explicación detallada). TF y SRF se expresan en  $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{h}^{-1}$  y  $\text{mm } \text{m}^2\text{W}^{-1}\text{h}^{-1}$ , respectivamente. Fuente: Pellicciotti et al. (2008)

# Capítulo 8

## Conclusiones y recomendaciones.

### 8.1. Conclusiones

En este estudio se evaluó la factibilidad al incorporar un nuevo factor en el modelo de índice de temperatura mejorado ETI [Pellicciotti et al. \(2005\)](#) que considere el sombreado topográfico en la superficie del glaciar Zongo. El “modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo” (SETI), considera ese nuevo factor a partir del “sombreado topográfico” que altera significativamente la radiación solar sobre la superficie glaciar en condiciones de cielo despejado.

Se recopilaron los datos meteorológicos diarios de temperatura del aire, precipitación, albedo, humedad relativa, velocidad del viento y radiación global, se trabajó para dos años hidrológicos septiembre 2004 - agosto 2005 y septiembre 2005 - agosto 2006, basados en el estudio de [Fuchs et al. \(2016\)](#) en esa época la disponibilidad de datos eran escasos motivo por el cual se tomaron dos años. Actualmente están disponibles datos meteorológicos para un periodo más largo en la página de Glacioclim. Gracias a este avance pueden evaluarse los procesos hidroglaciológicos con modelos sobre periodos más largos, pero no se justifica en el presente estudio debido a que en este trabajo estamos comparando los resultados de los modelos ETI y SETI, sobre un mismo periodo de estudio 2004-2006.

Para que los resultados de este estudio sean comparables con el modelo ETI, se calculó los parámetros de “*factor de temperatura (TF)*” y “*factor de radiación de onda corta (SRF)*”. El conjunto de parámetros óptimos en Zongo para la temporada húmeda fue similar a los determinados por [Pellicciotti et al. \(2008\)](#), [Carenzo et al. \(2009\)](#) y [Fuchs et al. \(2016\)](#). Sin embargo, durante la estación seca, tanto TF como SRF se redujeron significativamente debido a la ausencia de nubes por la baja humedad.

Las características locales en cada estaca distribuidas espacialmente sobre el glaciar juegan un papel importante en los procesos termodinámicos de fusión considerados en este estudio. Al considerar la variabilidad en la radiación solar incidente sobre la superficie del glaciar, debido al sombreado topográfico que incluye el relieve sombreado SR, sombras proyectadas CS, pendiente-aspecto SA y el combinado de todas las mencionadas C. Se presentan menores valores del error absoluto medio MAE con relación al modelo ETI y mejores ajustes entre los balances de masa acumulado observado y simulado para el caso de relieve sombreado SR, en algunas estacas se presentan mejores acuerdos y valores de MAE para la pendiente y aspecto SA y el combinado de los parámetros topográficos C.



(Olson and Rupper, 2019) consideraron en su investigación que estos parámetros que consideran el efecto de sombra en el glaciar, tendrían un papel importante para los modelos de fusión y balances de masas anuales. Gracias a ese análisis concluimos que el balance de masa anual depende de las características locales en cada sitio y que la radiación solar incidente en la superficie alteran significativamente a los glaciares particularmente a los de relieve accidentado. Se observó que para estacas ubicadas en elevaciones mayores a 5100 m s.n.m. en el glaciar, los resultados de simulación presentan mejores ajustes para los casos de relieve sombreado SR con menores valores del error absoluto medio MAE. Sin embargo para elevaciones menores que se encuentran en la parte baja de la zona de ablación en el glaciar, obtuvieron ajustes similares con respecto al modelo ETI pero mayores valores en el error absoluto medio MAE esto se debe a la resolución del DEM de 30 metros de resolución si mejoramos en la resolución del DEM se podría tener valores más significativos con respecto a su topografía (ver sección 7.2).

Se pudo evaluar el desempeño de los modelos ETI y SETI para las condiciones geográficas y de relieve del glaciar Zongo, lo que permite dar un rango de aplicabilidad, junto con una evaluación de sus respectivas de simulación a los procesos hidroglaciológicos de fusión y limitaciones, para ambos enfoques. Si bien los modelos de balance de masa modelo de índice de temperatura mejorado ETI pueden ser más precisos que los métodos de índice de temperatura mejorado, para superficies de relieve accidentado y complejo SETI (y especialmente en el enfoque del ajuste entre el balance de masa acumulado observado y simulado), las simplificaciones en las ecuaciones de fusión pueden ser útiles debido a la falta de datos, para estudios del régimen de fusión durante varias estaciones o para el uso de observaciones fuera de la capa límite del glaciar.

## 8.2. Recomendaciones

Para minimizar los indicadores de ajuste del modelo como MAE, el RMS y BIAS (sesgo). Se recomienda usar un periodo de estudio largo como por ejemplo diez años. Esto se debe a que el RMS penaliza más los errores grandes, es decir si tuviéramos un periodo largo de estudio serían analizados correctamente y no así para un periodo corto que al presentar un valor mayor en el error ocasionaría una incertidumbre entre los resultados obtenidos. Y los valores de bias (sesgo) no serían tan dispersos con respecto a los demás valores, si se tuviera el caso.

Para mejorar los resultados de nuestro modelo SETI de sombreado del glaciar se recomienda usar modelos digitales de elevación de mayor resolución para resaltar el importante papel del relieve en la radiación solar incidente para las bajas elevaciones.

Para futuras investigaciones se podría extender temporalmente el análisis sobre periodos más largos y posteriormente hacer un tratamiento de la información. Se debe tener un periodo largo de datos confiables y consistentes los cuales se usan para la calibración y validación del modelo porque no se validan los datos sino el desempeño del modelo para simular matemáticamente los procesos físicos de fusión o derretimiento.

Se recomienda realizar un análisis de la radiación solar directa  $I_a$  para cielos no despejados (con presencia de nubes) para la temporada húmeda.

Por ultimo se recomienda analizar el “factor de temperatura (TF)” y “factor de radiación de onda corta (SRF)” que se utilizaron como condiciones de borde al realizar la calibración de TF y SRF para los modelos ETI y SETI para la temporada (temporada húmeda y seca) de transición para los periodos de estudio 2004-2006.

# Bibliografía

- Aceituno, P. (1988). On the functioning of the southern oscillation in the south american sector. part i: Surface climate. *Monthly Weather Review*, 116(3):505–524.
- Angillieri, M. Y. E. (2009). A preliminary inventory of rock glaciers at 30 s latitude, cordillera frontal of san juan, argentina. *Quaternary International*, 195(1-2):151–157.
- Arnold, N., Willis, I., Sharp, M., Richards, K., and Lawson, W. (1996). A distributed surface energy-balance model for a small valley glacier. i. development and testing for haut glacier d'arolla, valais, switzerland. *Journal of Glaciology*, 42(140):77–89.
- Atmosphere, S. (1975). International organization for standardization. *ISO*, 2533:1975.
- Bodin, X., Francou, B., Arnaud, Y., Fabre, D., and Wagnon, P. (2010). State and dynamics of a tropical rock glacier on the altiplano (bolivia, 21.5 s). *Andes*, 10(1):91–100.
- Bourges, B. (1985). Improvement in solar declination computation. *Solar Energy*, 35(4):367–369.
- Brenning, A. (2005). Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the andes of central chile (33–35 s). *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(3):231–240.
- Brubaker, K., Rango, A., and Kustas, W. (1996). Incorporating radiation inputs into the snowmelt runoff model. *Hydrological processes*, 10(10):1329–1343.
- Carenzo, M., Pellicciotti, F., Rimkus, S., and Burlando, P. (2009). Assessing the transferability and robustness of an enhanced temperature-index glacier-melt model. *Journal of Glaciology*, 55(190):258–274.
- Chevallier, P., Pouyaud, B., Suarez, W., and Condom, T. (2011). Climate change threats to environment in the tropical andes: glaciers and water resources. *Regional Environmental Change*, 11(1):179–187.
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L., Arendt, A., Bauder, A., Braithwaite, R., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L., et al. (2011). Glossary of glacier mass balance and related terms, ihp-vii technical documents in hydrology no. 86, iacs contribution no. 2.
- Corripio, J. G. (2003). Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from dems and solar radiation modelling in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(1):1–23.
- Cuffey, K. M. and Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers*. Academic Press.

- Dozier, J. (1980). A clear-sky spectral solar radiation model for snow-covered mountainous terrain. *Water Resources Research*, 16(4):709–718.
- Dozier, J., Bruno, J., and Downey, P. (1981). A faster solution to the horizon problem. *Computers & Geosciences*, 7(2):145–151.
- Dunne, J., Elmore, D., and Muzikar, P. (1999). Scaling factors for the rates of production of cosmogenic nuclides for geometric shielding and attenuation at depth on sloped surfaces. *Geomorphology*, 27(1-2):3–11.
- Favier, V., Wagnon, P., Chazarin, J.-P., Maisincho, L., and 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(D18).
- Foley, J. D., Van, F. D., Van Dam, A., Feiner, S. K., Hughes, J. F., Angel, E., and Hughes, J. (1996). *Computer graphics: principles and practice*, volume 12110. Addison-Wesley Professional.
- Francou, B., Fabre, D., Pouyaud, B., Jomelli, V., and Arnaud, Y. (1999). Symptoms of degradation in a tropical rock glacier, Bolivian Andes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10(1):91–100.
- Francou, B. and Pizarro, L. (1985). El niño y la sequía en los altos Andes centrales. *Bull. Inst. Fr. Et. And.*, 14(1-2):1–18.
- Francou, B., Pouyaud, B., Bucher, R., Cáceres, B., Chazarin, J.-P., Chevallier, P., L'Hôte, Y., Machaca, A., Maisincho, L., Mendoza, J., et al. (2004a). Métodos de observación de glaciares en los Andes tropicales: mediciones de terreno y procesamiento de datos: version-1: 2004. *Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Documento GREAT ICE (IRD) en versión CD*.
- Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J., Silvestre, J., Ginot, P., Cáceres, B., Condom, T., Villacis, M., Ceballos, J., Anthelme, F., Dangles, O., Favier, V., Maisincho, L., Jomelli, V., Vuille, M., Wagnon, P., Lejeune, Y., Ramallo, C., and Mendoza Rodríguez, J. (2013). *Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático*. 10.13140/RG.2.1.1255.4082.
- Francou, B., Ribstein, P., Saravia, R., and Tiriau, E. (1995). Monthly balance and water discharge of an inter-tropical glacier: Zongo glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16 s. *Journal of Glaciology*, 41(137):61–67.
- Francou, B. and Vincent, C. (2007). *Les glaciers à l'épreuve du climat*. IRD Editions.
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V., and Cáceres, B. (2004b). New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0 28 s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D18).
- Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J., and Sicart, J.-E. (2003). Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16 s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D5).
- Fuchs, A. J. P. (2013). *Melt, Runoff and Surface Mass Balance Modelling in the Tropical Andes Using an Enhanced Temperature-Index Approach*. PhD thesis, TOHOKU UNIVERSITY.

- Fuchs, P., Asaoka, Y., and Kazama, S. (2016). Modelling melt, runoff, and mass balance of a tropical glacier in the bolivian andes using an enhanced temperature-index model. *Hydrological Research Letters*, 10(2):51–59.
- Garreaud, R. and Aceituno, P. (2001). Interannual rainfall variability over the south american altiplano. *Journal of climate*, 14(12):2779–2789.
- Garreaud, R., Vuille, M., and Clement, A. C. (2003). The climate of the altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 194(1-3):5–22.
- Ginot, P., Litt, M., Leonardini, G., Ramallo, C., Cerutti, A., Rojas, F., Fuertes, R., and Mendoza Rodríguez, J. (2010). Cuencas glaciares zongo - chacaltaya - charquini sur, bolivia 16°s : mediciones glaciológicas, hidrológicas y meteorológicas, año hidrológico 2008-2009.
- Hamlet, A. F. and Lettenmaier, D. P. (1999). Effects of climate change on hydrology and water resources in the columbia river basin 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(6):1597–1623.
- Hastenrath, S. (1981). *The glaciation of the Ecuadorian Andes*.
- Hock, R. (1999). A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, 45(149):101–111.
- Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of hydrology*, 282(1-4):104–115.
- Horn, B. K. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69(1):14–47.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. ACADEMIC PRESS CNADA.
- Jordan, E. (1991). Die gletscher der bolivianischen anden. eine photogrammetrisch-kartographische bestandsaufnahme der gletscher boliviens als grundlage für klimatische deutungen und potential für die wirtschaftliche nutzung. *Erdwissenschaftliche Forschung*.
- Kargel, J. S., Leonard, G. J., Bishop, M. P., K ä ä b, A., and Raup, B. H. (2014). *Mediciones globales de hielo terrestre desde el espacio*. Springer.
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1-4):93–103.
- Kaser, G. (2001). Glacier-climate interaction at low latitudes. *Journal of Glaciology*, 47(157):195–204.
- Kaser, G. and Osmaston, H. (2002). *Tropical glaciers*. Cambridge University Press.
- Kiehl, J. T. and Trenberth, K. E. (1997). Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2):197–208.

- Kohler, T., Giger, M., Hurni, H., Ott, C., Wiesmann, U., von Dach, S. W., and Maselli, D. (2010). Mountains and climate change: a global concern. *Mountain Research and Development*, 30(1):53–56.
- Kotlyakov, V. and Komarova, A. (2006). *Elsevier's dictionary of geography: in English, Russian, French, Spanish and German*. elsevier.
- Kuhn, M. (1987). Micro-meteorological conditions for snow melt. *Journal of glaciology*, 33(113):24–26.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R. H., et al. (2007). Observations: changes in snow, ice and frozen ground.
- Leon, W. (2012). Prueba de hipótesis iii. *Recuperado de: <http://www.ucipfg.com/Repositorio/M-GAP/MGAP>*, 5.
- Leonardini, G. A. (2010). Analisis mensual de los balances de masa glaciologico e hidrologico del glaciar tropical zongo (bolivia). *Universidad Mayor de San Andres*, 1(1):1–144.
- Márquez, A. and Francou, B. (1995). Cordillera blanca: glaciares en la historia.
- Martinec, J. et al. (1975). New methods in snowmelt-runoff studies in representative basins. In *IAHS Symposium on Hydrological Characteristics of River Basins, Tokyo, Japan*, volume 117, pages 99–107.
- Martinec, J., Rango, A., and Roberts, R. (2008). Snowmelt runoff model (srm) user's manual. *Complete Book*.
- Millar, C. I. and Westfall, R. D. (2008). Rock glaciers and related periglacial landforms in the sierra nevada, ca, usa; inventory, distribution and climatic relationships. *Quaternary International*, 188(1):90–104.
- Oerlemans, J. and Knap, W. (1998). A 1 year record of global radiation and albedo in the ablation zone of morteratschgletscher, switzerland. *Journal of Glaciology*, 44(147):231–238.
- Office, G. B. N. A. and Office, U. S. N. O. N. A. (1974). *Explanatory supplement to the astronomical ephemeris and the American ephemeris and nautical almanac*. HM Stationery Office.
- Olson, M. and Rupper, S. (2019). Impacts of topographic shading on direct solar radiation for valley glaciers in complex topography. *The Cryosphere*, 13(1):29–40.
- Page, J. K. (1986). Prediction of solar radiation on inclined surfaces.
- Paterson, W. S. B. (1994). *Physics of glaciers*. Butterworth-Heinemann.
- Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M., and Corripio, J. (2005). An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for haut glacier d'arolla, switzerland. *Journal of Glaciology*, 51(175):573–587.

- Pellicciotti, F., Helbing, J., Rivera, A., Favier, V., Corripio, J., Araos, J., Sicart, J.-E., and Carezno, M. (2008). A study of the energy balance and melt regime on juncal norte glacier, semi-arid andes of central chile, using melt models of different complexity. *Hydrological Processes*, 22(19):3980–3997.
- Pielke, R. A. (1984). Mesoscale meteorological modeling. *San Diego: Academic Press*.
- Quick, A. (2004). Derivation relating altitude to air pressure. *Portland State, Aerospace Society*.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J., Huggel, C., et al. (2012). Review article of the current state of glaciers in the tropical andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere Discussions*, 6(4):2477–2536.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J., Huggel, C., et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1):81–102.
- Rabatel, A., Mendoza, J., Soruco, A., Fuertes, R., Gallaire, R., Francou, B., Machaca, A., Wagnon, P., Poirier, J.-C., Chazarin, J.-P., et al. (2004). Glaciares de zongo, chacaltaya y charquini sur (16° s bolivia): mediciones meteorologicas, hidrologicas y glaciologicas: ano hidrológico 2002-2003.
- Rangecroft, S., Harrison, S., Anderson, K., Magrath, J., Castel, A. P., and Pacheco, P. (2013). Climate change and water resources in arid mountains: an example from the bolivian andes. *Ambio*, 42(7):852–863.
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., and Vuille, M. (2016). Balance de masa glacial. *Valdivia, Chile: Ediciones CECs*.
- Seiler, C., Hutjes, R. W., and Kabat, P. (2013). Climate variability and trends in bolivia. *Journal of applied meteorology and climatology*, 52(1):130–146.
- Seligman, Z. M. (2009). Rock glacier distribution, activity and movement, northern absaroka and beartooth ranges, mt, usa.
- Sicart, J. E., Hock, R., Ribstein, P., Litt, M., and Ramirez, E. (2011). Analysis of seasonal variations in mass balance and meltwater discharge of the tropical zongo glacier by application of a distributed energy balance model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D13).
- Sicart, J. E., Hock, R., and Six, D. (2008). Glacier melt, air temperature, and energy balance in different climates: The bolivian tropics, the french alps, and northern sweden. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D24).
- Sicart, J. E., Ribstein, P., Chazarin, J. P., and Berthier, E. (2002). Solid precipitation on a tropical glacier in bolivia measured with an ultrasonic depth gauge. *Water Resources Research*, 38(10):7–1.
- Sicart, J. E., Ribstein, P., Francou, B., Pouyaud, B., and Condom, T. (2007). Glacier mass balance of tropical zongo glacier, bolivia, comparing hydrological and glaciological methods. *Global and Planetary Change*, 59(1-4):27–36.

- Sicart, J. E., Ribstein, P., Wagnon, P., and Brunstein, D. (2001). Clear-sky albedo measurements on a sloping glacier surface: A case study in the bolivian andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D23):31729–31737.
- Sicart, J. E., Wagnon, P., and Ribstein, P. (2005). Atmospheric controls of the heat balance of zongo glacier (16 s, bolivia). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D12).
- Singh, P. (2001). *Snow and glacier hydrology*, volume 37. Springer Science & Business Media.
- Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., Ribstein, P., Berger, T., Sicart, J.-E., Wagnon, P., Arnaud, Y., Favier, V., and Lejeune, Y. (2009). Mass balance of glacier zongo, bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. *Annals of Glaciology*, 50(50):1–8.
- Spencer, J. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5):172.
- Stauffer, D. R. and Seaman, N. L. (1990). Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. part i: Experiments with synoptic-scale data. *Monthly Weather Review*, 118(6):1250–1277.
- Systems, J. S. (2012). Aster. [urlhttps://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/3.html](https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/3.html).
- Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., and Iwasaki, A. (2011). The characteristics of aster gdem version 2, igarss, july 2011. *Accessed October, 7:2015*.
- Troll, C., Troll, C., Troll, C., Troll, C., and Geographer, G. (1941). *Studien zur vergleichenden Geographie der Hochgebirge der Erde*. Verlag nicht ermittelbar.
- Trombotto, D., Buk, E., and Hernández, J. (1999). Rock glaciers in the southern central andes (approx. 33–34 s), cordillera frontal, mendoza, argentina. *Bamberger Geographische Schriften*, 19:145–173.
- Vuille, M. and Bradley, R. S. (2000). Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical andes. *Geophysical Research Letters*, 27(23):3885–3888.
- Wagnon, P., Ribstein, P., Francou, B., and Pouyaud, B. (1999a). Annual cycle of energy balance of zongo glacier, cordillera real, bolivia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D4):3907–3923.
- Wagnon, P., Ribstein, P., Francou, B., and Sicart, J.-E. (2001). Anomalous heat and mass budget of glacier zongo, bolivia, during the 1997/98 el nino year. *Journal of Glaciology*, 47(156):21–28.
- Wagnon, P., Ribstein, P., Kaser, G., and Berton, P. (1999b). Energy balance and runoff seasonality of a bolivian glacier. *Global and planetary change*, 22(1-4):49–58.
- Walraven, R. (1977). Calculating the position of the sun. *Solar energy*, 20(5):393–397.
- Wang, J., Robinson, G. J., and White, K. (2000). Generating viewsheds without using sightlines. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 66(1):87–90.
- Zemp, M., Nussbaumer, S., Gärtner-Roer, I., Hoelzle, M., Paul, F., and Haeberli, W. (2011). Glacier mass balance bulletin no. 11 (2008-2009).

# Apéndice A

## ANEXOS

### A.1. Datos de entrada medidos en las estaciones en el glaciar Zongo para los años septiembre 2004 - agosto 2006.

Tabla A.1: Datos de entrada medidos en las estaciones en el glaciar Zongo, para el periodo 2004 a 2005.

Date	T (°C)	P (mm)	$\alpha$	G (W $m^{-2}$ )	RH (%)	u (m $s^{-1}$ )
01/09/2004 12:00	0.4	0.0	0.76	178.5	67.9	2.6
02/09/2004 12:00	-0.9	0.0	0.74	170.3	67.1	2.0
03/09/2004 12:00	-1.6	0.0	0.72	209.3	75.9	2.4
04/09/2004 12:00	0.4	1.6	0.72	223.1	68.3	3.1
05/09/2004 12:00	1.7	0.0	0.63	297.7	56.1	2.2
06/09/2004 12:00	-0.5	1.1	0.72	182.4	72.7	2.1
07/09/2004 12:00	-1.1	11.2	0.83	119.4	78.7	2.7
08/09/2004 12:00	-1.9	4.4	0.80	178.4	87.4	2.3
09/09/2004 12:00	-2.1	11.1	0.90	124.1	94.1	1.8
10/09/2004 12:00	-0.1	0.0	0.75	235.7	75.4	2.1
11/09/2004 12:00	0.7	0.0	0.74	207.2	69.2	2.6
12/09/2004 12:00	-0.8	0.0	0.59	277.0	78.3	1.6
13/09/2004 12:00	1.0	0.0	0.55	262.1	61.3	2.1
14/09/2004 12:00	1.4	0.0	0.49	323.9	48.7	2.2
15/09/2004 12:00	-1.5	0.0	0.58	197.0	73.3	3.2
16/09/2004 12:00	-2.7	2.5	0.77	198.5	80.5	2.8
17/09/2004 12:00	-0.9	0.0	0.59	253.5	43.7	3.1
18/09/2004 12:00	0.2	0.0	0.53	252.1	50.3	2.6
19/09/2004 12:00	0.5	0.0	0.49	259.0	58.3	2.2
20/09/2004 12:00	-0.8	0.0	0.54	242.5	72.3	2.2
21/09/2004 12:00	0.1	2.5	0.53	143.2	82.1	2.0
22/09/2004 12:00	-1.0	3.7	0.70	160.3	81.5	2.0
23/09/2004 12:00	-1.1	3.4	0.73	144.4	92.5	1.6
24/09/2004 12:00	-0.8	0.0	0.52	277.5	79.7	1.8



25/09/2004 12:00	-1.7	0.0	0.52	177.0	83.0	2.4
26/09/2004 12:00	-0.4	0.0	0.45	246.7	84.3	1.9
27/09/2004 12:00	-1.8	4.5	0.70	90.5	93.3	2.2
28/09/2004 12:00	-0.6	1.1	0.63	233.2	70.4	3.7
29/09/2004 12:00	-1.9	9.2	0.72	140.8	87.5	2.4
30/09/2004 12:00	-1.6	0.0	0.82	159.6	88.6	2.7
01/10/2004 12:00	-2.2	10.7	0.90	123.8	93.7	1.6
02/10/2004 12:00	-0.6	0.0	0.73	335.6	59.2	4.3
03/10/2004 12:00	0.2	1.4	0.64	272.6	67.3	2.4
04/10/2004 12:00	-1.5	0.7	0.66	188.9	84.1	1.6
05/10/2004 12:00	-1.0	0.0	0.54	294.8	58.8	2.0
06/10/2004 12:00	0.0	0.0	0.47	284.6	48.8	2.3
07/10/2004 12:00	0.9	2.3	0.42	301.8	55.4	2.2
08/10/2004 12:00	0.7	9.6	0.51	167.3	76.5	2.5
09/10/2004 12:00	-0.6	9.9	0.79	137.4	85.5	2.9
10/10/2004 12:00	-0.4	0.0	0.75	217.6	70.9	3.0
11/10/2004 12:00	0.4	2.5	0.71	183.7	63.2	2.8
12/10/2004 12:00	0.3	0.0	0.62	274.3	53.9	4.7
13/10/2004 12:00	0.7	0.0	0.43	310.7	62.2	3.2
14/10/2004 12:00	0.4	0.0	0.41	172.4	75.4	2.3
15/10/2004 12:00	1.0	0.0	0.33	200.0	84.5	1.8
16/10/2004 12:00	1.3	0.0	0.32	156.7	82.8	2.3
17/10/2004 12:00	2.0	0.0	0.26	202.9	71.3	2.7
18/10/2004 12:00	1.6	0.0	0.25	191.3	78.1	2.2
19/10/2004 12:00	-0.4	13.0	0.36	85.7	90.6	2.3
20/10/2004 12:00	1.0	0.0	0.58	284.3	61.2	2.8
21/10/2004 12:00	0.4	14.4	0.61	154.3	77.5	2.1
22/10/2004 12:00	0.7	0.0	0.77	150.1	75.0	2.1
23/10/2004 12:00	2.6	0.0	0.64	214.9	65.0	2.3
24/10/2004 12:00	1.7	5.2	0.56	142.7	73.1	2.8
25/10/2004 12:00	2.0	0.0	0.22	350.9	47.8	3.2
26/10/2004 12:00	0.5	0.0	0.23	347.1	29.7	4.7
27/10/2004 12:00	-0.4	4.4	0.24	327.1	66.9	2.7
28/10/2004 12:00	-0.2	0.0	0.30	345.6	69.1	1.6
29/10/2004 12:00	1.8	0.0	0.20	328.1	45.4	1.9
30/10/2004 12:00	2.1	0.0	0.17	353.4	60.9	1.9
31/10/2004 12:00	-0.3	0.0	0.23	227.2	75.3	2.2
01/11/2004 12:00	0.2	0.0	0.18	169.5	88.1	1.1
02/11/2004 12:00	2.3	0.0	0.13	244.6	73.0	1.7
03/11/2004 12:00	3.1	0.0	0.14	227.1	75.2	2.1
04/11/2004 12:00	2.0	1.0	0.14	160.6	79.9	1.7
05/11/2004 12:00	1.1	3.8	0.20	221.5	88.0	1.6
06/11/2004 12:00	-0.4	1.4	0.47	97.5	93.3	1.5
07/11/2004 12:00	-0.5	23.3	0.95	143.1	90.9	1.9

08/11/2004 12:00	0.9	6.9	0.82	156.4	78.4	2.9
09/11/2004 12:00	2.1	1.6	0.71	189.6	61.1	3.0
10/11/2004 12:00	3.4	0.0	0.56	333.1	55.6	3.6
11/11/2004 12:00	2.3	0.0	0.24	310.7	59.8	2.8
12/11/2004 12:00	3.5	0.0	0.15	304.9	49.4	2.1
13/11/2004 12:00	2.2	0.0	0.18	299.0	66.8	1.6
14/11/2004 12:00	1.4	5.3	0.23	184.4	74.7	3.0
15/11/2004 12:00	1.1	1.1	0.35	182.0	72.0	2.7
16/11/2004 12:00	1.0	0.0	0.19	140.7	80.0	1.9
17/11/2004 12:00	0.4	9.9	0.20	211.6	91.5	2.0
18/11/2004 12:00	0.5	0.0	0.42	335.3	74.6	3.2
19/11/2004 12:00	0.3	1.9	0.20	189.4	75.1	1.8
20/11/2004 12:00	-0.3	3.2	0.41	196.7	90.2	1.7
21/11/2004 12:00	0.4	6.9	0.24	165.1	83.6	1.5
22/11/2004 12:00	1.0	0.0	0.49	256.5	71.3	2.0
23/11/2004 12:00	-0.4	8.6	0.35	169.6	86.8	1.7
24/11/2004 12:00	-0.3	2.1	0.51	178.0	86.4	1.5
25/11/2004 12:00	0.6	6.6	0.38	168.8	86.7	2.3
26/11/2004 12:00	2.3	0.0	0.51	247.8	70.3	2.6
27/11/2004 12:00	2.1	6.3	0.16	226.1	79.5	2.1
28/11/2004 12:00	0.3	6.2	0.72	122.4	86.5	2.4
29/11/2004 12:00	-0.4	1.6	0.48	203.8	87.1	2.0
30/11/2004 12:00	-0.8	1.6	0.29	130.9	88.0	1.7
01/12/2004 12:00	0.9	0.0	0.25	226.6	77.2	1.4
02/12/2004 12:00	1.9	0.0	0.14	228.8	75.1	1.7
03/12/2004 12:00	1.6	0.0	0.16	156.1	84.1	1.7
04/12/2004 12:00	2.0	0.0	0.12	240.1	74.5	1.7
05/12/2004 12:00	1.8	0.0	0.14	195.2	70.0	1.9
06/12/2004 12:00	3.3	0.0	0.12	247.0	70.2	1.5
07/12/2004 12:00	3.3	0.0	0.12	230.3	75.0	1.7
08/12/2004 12:00	1.5	0.0	0.13	179.8	87.3	1.6
09/12/2004 12:00	1.0	0.0	0.12	168.1	89.1	1.6
10/12/2004 12:00	-0.6	17.1	0.79	189.1	85.6	2.4
11/12/2004 12:00	-0.1	0.0	0.63	180.3	85.7	1.8
12/12/2004 12:00	2.1	0.0	0.26	287.0	80.5	1.9
13/12/2004 12:00	0.3	18.6	0.26	170.7	89.8	1.7
14/12/2004 12:00	1.2	0.0	0.58	164.3	86.2	1.8
15/12/2004 12:00	0.1	24.2	0.91	151.8	87.9	2.1
16/12/2004 12:00	2.1	0.0	0.75	219.7	83.7	2.2
17/12/2004 12:00	0.8	14.5	0.74	243.4	87.5	2.0
18/12/2004 12:00	1.0	4.8	0.71	173.7	83.2	1.4
19/12/2004 12:00	2.7	0.0	0.58	315.4	62.6	1.5
20/12/2004 12:00	1.9	0.7	0.49	198.1	79.5	1.7
21/12/2004 12:00	3.2	0.0	0.27	269.1	73.1	1.3

22/12/2004 12:00	2.6	0.0	0.14	231.9	83.1	1.7
23/12/2004 12:00	2.5	0.0	0.39	173.6	78.7	1.5
24/12/2004 12:00	2.3	2.7	0.27	154.8	64.4	2.3
25/12/2004 12:00	0.4	1.6	0.39	172.5	84.6	2.1
26/12/2004 12:00	-0.1	1.8	0.32	248.9	82.7	1.9
27/12/2004 12:00	-0.5	5.9	0.27	197.8	90.9	1.3
28/12/2004 12:00	1.0	0.0	0.27	225.8	73.7	1.5
29/12/2004 12:00	0.0	5.5	0.23	230.1	87.1	1.5
30/12/2004 12:00	-0.8	8.5	0.83	133.7	93.1	1.9
31/12/2004 12:00	0.1	11.0	0.78	162.3	88.4	2.0
01/01/2005 12:00	1.1	8.1	0.71	141.4	85.3	2.0
02/01/2005 12:00	0.9	21.2	0.83	198.7	79.9	1.6
03/01/2005 12:00	1.8	2.1	0.70	277.8	73.5	1.6
04/01/2005 12:00	2.4	0.0	0.40	324.3	56.1	1.2
05/01/2005 12:00	3.2	0.0	0.44	321.0	51.8	1.2
06/01/2005 12:00	2.3	0.0	0.44	284.6	61.1	1.2
07/01/2005 12:00	-0.5	13.7	0.60	184.3	84.1	1.3
08/01/2005 12:00	0.4	2.1	0.30	210.7	87.9	1.4
09/01/2005 12:00	0.7	6.2	0.25	134.9	89.5	1.4
10/01/2005 12:00	-0.1	21.5	0.95	176.9	91.3	1.5
11/01/2005 12:00	0.2	6.9	0.41	114.1	91.3	1.5
12/01/2005 12:00	0.8	11.6	0.25	114.6	90.3	1.6
13/01/2005 12:00	1.3	5.1	0.25	143.2	90.6	1.7
14/01/2005 12:00	0.8	13.7	0.27	112.9	88.8	1.7
15/01/2005 12:00	2.0	0.0	0.34	235.8	77.4	1.8
16/01/2005 12:00	-0.4	27.4	0.95	152.3	79.4	1.8
17/01/2005 12:00	1.0	0.0	0.81	168.1	69.3	1.9
18/01/2005 12:00	1.6	1.1	0.38	191.1	79.5	2.0
19/01/2005 12:00	1.3	24.4	0.35	129.5	85.8	2.0
20/01/2005 12:00	0.0	21.0	0.95	145.9	87.6	2.1
21/01/2005 12:00	0.1	13.6	0.95	142.6	87.7	2.2
22/01/2005 12:00	1.7	0.0	0.71	270.7	73.5	2.2
23/01/2005 12:00	1.3	0.0	0.24	136.9	82.4	2.3
24/01/2005 12:00	1.2	3.3	0.25	117.2	78.6	2.3
25/01/2005 12:00	0.4	8.2	0.47	98.6	89.4	2.4
26/01/2005 12:00	0.2	6.0	0.25	152.1	90.1	2.5
27/01/2005 12:00	1.9	0.0	0.29	202.0	77.9	1.8
28/01/2005 12:00	2.1	0.0	0.71	207.6	67.4	1.2
29/01/2005 12:00	3.3	0.0	0.66	292.4	63.0	1.4
30/01/2005 12:00	3.2	0.0	0.68	215.1	62.0	1.8
31/01/2005 12:00	-0.2	13.2	0.95	88.8	82.2	2.1
01/02/2005 12:00	0.0	12.9	0.85	158.5	88.5	1.8
02/02/2005 12:00	0.8	3.7	0.74	173.8	91.9	2.1
03/02/2005 12:00	1.5	0.0	0.65	340.9	82.4	1.2

04/02/2005 12:00	1.6	0.0	0.61	343.4	71.9	2.2
05/02/2005 12:00	2.1	0.0	0.57	391.8	69.8	2.2
06/02/2005 12:00	0.5	4.8	0.67	212.2	78.1	1.8
07/02/2005 12:00	0.3	7.4	0.82	161.3	81.3	3.0
08/02/2005 12:00	0.8	18.4	0.91	141.7	85.2	1.0
09/02/2005 12:00	0.8	4.1	0.81	129.3	92.4	1.3
10/02/2005 12:00	0.5	27.8	0.91	215.6	89.0	1.2
11/02/2005 12:00	0.5	13.7	0.86	202.1	92.2	1.6
12/02/2005 12:00	0.0	4.8	0.83	167.8	93.6	2.0
13/02/2005 12:00	0.3	16.6	0.86	158.0	93.3	1.4
14/02/2005 12:00	0.6	9.7	0.83	157.3	88.3	1.5
15/02/2005 12:00	0.8	2.5	0.79	141.6	81.9	2.1
16/02/2005 12:00	0.6	0.0	0.78	208.8	85.2	1.5
17/02/2005 12:00	-0.8	34.9	0.95	198.8	85.5	2.0
18/02/2005 12:00	-1.0	4.2	0.84	146.4	87.7	2.3
19/02/2005 12:00	-0.5	3.8	0.86	191.7	90.0	2.1
20/02/2005 12:00	-0.2	22.1	0.83	212.8	92.7	2.5
21/02/2005 12:00	0.0	21.6	0.84	168.3	93.8	2.3
22/02/2005 12:00	0.9	8.6	0.83	127.9	93.8	1.3
23/02/2005 12:00	0.4	13.3	0.92	118.9	86.5	1.5
24/02/2005 12:00	1.4	1.4	0.79	129.1	82.9	2.4
25/02/2005 12:00	1.1	1.1	0.76	163.1	85.4	2.4
26/02/2005 12:00	2.0	10.3	0.78	152.0	81.3	1.8
27/02/2005 12:00	2.5	0.0	0.70	186.1	70.5	2.2
28/02/2005 12:00	2.5	0.0	0.72	192.4	69.3	1.8
01/03/2005 12:00	0.8	4.1	0.79	137.4	90.2	1.7
02/03/2005 12:00	1.2	5.8	0.74	142.6	91.0	0.9
03/03/2005 12:00	2.3	2.1	0.67	286.5	82.6	1.4
04/03/2005 12:00	3.3	0.0	0.62	369.0	48.2	1.9
05/03/2005 12:00	2.1	0.0	0.65	301.1	59.2	1.9
06/03/2005 12:00	3.8	0.0	0.63	311.3	38.9	1.9
07/03/2005 12:00	4.3	0.0	0.63	297.3	45.7	2.1
08/03/2005 12:00	3.4	0.0	0.65	207.8	69.7	1.9
09/03/2005 12:00	2.4	0.0	0.63	287.8	73.4	2.5
10/03/2005 12:00	1.0	11.6	0.83	130.7	89.2	1.0
11/03/2005 12:00	1.5	0.0	0.63	242.3	79.9	1.9
12/03/2005 12:00	1.7	10.0	0.63	156.0	80.6	2.8
13/03/2005 12:00	1.4	3.0	0.70	106.6	82.1	2.5
14/03/2005 12:00	1.3	1.4	0.63	157.9	80.6	1.7
15/03/2005 12:00	3.0	0.0	0.51	323.0	39.9	2.0
16/03/2005 12:00	2.8	0.0	0.35	284.5	54.1	1.9
17/03/2005 12:00	3.6	0.0	0.18	312.1	46.3	2.1
18/03/2005 12:00	2.4	0.0	0.16	310.1	68.8	2.1
19/03/2005 12:00	0.3	0.0	0.21	199.8	86.1	1.5

20/03/2005 12:00	1.7	0.0	0.21	210.4	75.4	1.5
21/03/2005 12:00	1.8	1.4	0.23	226.8	72.1	2.1
22/03/2005 12:00	0.2	3.4	0.53	137.1	87.2	2.3
23/03/2005 12:00	0.6	2.9	0.69	118.8	87.5	2.1
24/03/2005 12:00	1.5	1.4	0.32	235.8	78.8	1.3
25/03/2005 12:00	2.5	0.0	0.21	246.3	68.8	1.8
26/03/2005 12:00	3.1	0.0	0.18	271.1	60.1	1.8
27/03/2005 12:00	2.6	0.0	0.19	249.2	66.6	2.0
28/03/2005 12:00	1.4	5.5	0.21	206.5	82.5	1.3
29/03/2005 12:00	1.5	2.1	0.28	188.8	78.9	1.9
30/03/2005 12:00	0.7	0.0	0.28	174.4	83.6	2.2
31/03/2005 12:00	0.4	9.5	0.51	109.6	92.5	1.6
01/04/2005 12:00	0.7	0.0	0.47	88.5	84.7	1.7
02/04/2005 12:00	1.4	2.7	0.41	101.4	82.7	1.9
03/04/2005 12:00	0.4	19.2	0.95	107.5	80.6	1.5
04/04/2005 12:00	1.9	0.0	0.70	182.5	78.2	1.6
05/04/2005 12:00	1.8	0.0	0.56	162.6	84.9	2.2
06/04/2005 12:00	2.2	0.0	0.29	194.4	80.7	2.0
07/04/2005 12:00	1.9	4.4	0.21	123.3	79.0	2.4
08/04/2005 12:00	2.6	0.0	0.32	276.1	77.2	2.3
09/04/2005 12:00	2.5	0.0	0.21	208.0	68.9	1.8
10/04/2005 12:00	3.2	0.0	0.18	279.1	49.4	2.8
11/04/2005 12:00	2.4	0.0	0.24	180.8	74.6	3.5
12/04/2005 12:00	0.1	3.7	0.52	206.4	78.6	2.4
13/04/2005 12:00	-1.0	3.4	0.51	84.7	87.6	2.4
14/04/2005 12:00	2.5	0.0	0.61	163.9	66.3	2.5
15/04/2005 12:00	2.0	0.0	0.37	171.9	66.3	1.9
16/04/2005 12:00	1.9	0.0	0.27	183.1	69.1	2.5
17/04/2005 12:00	2.1	0.0	0.22	178.0	70.6	2.9
18/04/2005 12:00	1.7	0.0	0.22	230.3	66.2	2.4
19/04/2005 12:00	1.8	0.0	0.22	197.6	43.9	2.5
20/04/2005 12:00	1.0	0.0	0.24	244.0	56.2	3.0
21/04/2005 12:00	0.4	0.0	0.27	169.1	68.3	2.3
22/04/2005 12:00	1.9	0.0	0.24	191.4	62.9	2.6
23/04/2005 12:00	1.1	0.0	0.24	152.2	78.3	2.2
24/04/2005 12:00	0.1	2.1	0.27	104.8	87.8	1.6
25/04/2005 12:00	0.0	1.8	0.71	96.2	84.3	3.0
26/04/2005 12:00	1.2	0.0	0.47	260.4	51.4	4.6
27/04/2005 12:00	2.8	0.0	0.28	289.1	26.3	5.9
28/04/2005 12:00	1.4	0.0	0.24	285.1	26.5	4.9
29/04/2005 12:00	1.0	0.0	0.22	256.4	42.9	2.8
30/04/2005 12:00	0.7	0.0	0.21	272.1	48.6	2.1
01/05/2005 12:00	0.7	0.0	0.22	264.2	49.1	2.1
02/05/2005 12:00	0.7	0.0	0.26	200.1	54.1	2.2

03/05/2005 12:00	1.2	0.0	0.23	260.3	57.6	2.5
04/05/2005 12:00	0.5	0.0	0.27	139.4	65.9	1.7
05/05/2005 12:00	0.3	0.0	0.34	181.1	63.9	2.3
06/05/2005 12:00	-0.8	0.0	0.31	134.9	71.8	2.2
07/05/2005 12:00	-0.7	0.0	0.28	137.2	70.2	2.9
08/05/2005 12:00	0.1	0.0	0.22	279.0	32.1	3.2
09/05/2005 12:00	0.9	0.0	0.21	268.8	39.6	2.9
10/05/2005 12:00	2.4	0.0	0.20	274.0	29.8	3.5
11/05/2005 12:00	1.4	0.0	0.20	272.5	45.2	2.7
12/05/2005 12:00	1.3	0.0	0.19	203.1	52.1	3.1
13/05/2005 12:00	1.5	0.0	0.14	225.3	58.6	3.1
14/05/2005 12:00	0.8	0.0	0.51	158.1	59.7	3.2
15/05/2005 12:00	0.5	0.0	0.23	213.3	65.2	2.5
16/05/2005 12:00	1.0	0.0	0.16	236.7	74.7	1.6
17/05/2005 12:00	0.2	0.0	0.15	102.6	74.7	2.4
18/05/2005 12:00	1.7	0.0	0.14	239.6	57.4	3.1
19/05/2005 12:00	2.2	0.0	0.13	249.3	59.7	1.9
20/05/2005 12:00	3.3	0.0	0.14	252.6	30.1	4.1
21/05/2005 12:00	1.7	0.0	0.12	231.7	59.2	2.1
22/05/2005 12:00	3.0	0.0	0.13	228.7	36.7	6.2
23/05/2005 12:00	3.0	0.0	0.14	260.3	14.4	6.2
24/05/2005 12:00	2.2	0.0	0.17	243.1	13.9	7.0
25/05/2005 12:00	1.9	0.0	0.15	261.2	35.4	3.2
26/05/2005 12:00	1.5	0.0	0.17	262.0	18.2	4.1
27/05/2005 12:00	2.8	0.0	0.17	250.4	24.4	2.6
28/05/2005 12:00	1.3	0.0	0.18	252.5	36.3	2.4
29/05/2005 12:00	1.7	0.0	0.19	230.8	44.5	2.5
30/05/2005 12:00	0.1	1.4	0.24	169.7	59.6	2.5
31/05/2005 12:00	-0.2	0.0	0.49	251.7	46.0	3.0
01/06/2005 12:00	0.9	0.0	0.38	252.1	29.1	3.4
02/06/2005 12:00	2.5	0.0	0.26	253.6	22.3	4.6
03/06/2005 12:00	2.5	0.0	0.23	248.8	33.7	2.8
04/06/2005 12:00	2.1	0.0	0.21	246.5	39.5	2.8
05/06/2005 12:00	1.5	0.0	0.21	241.8	44.6	2.2
06/06/2005 12:00	0.9	0.0	0.21	207.2	52.4	2.7
07/06/2005 12:00	0.2	0.0	0.20	216.0	45.6	2.4
08/06/2005 12:00	-1.4	0.0	0.22	191.0	62.2	2.2
09/06/2005 12:00	-2.7	0.0	0.35	83.7	70.4	2.4
10/06/2005 12:00	-1.4	0.0	0.25	239.6	32.8	4.9
11/06/2005 12:00	0.3	0.0	0.22	250.4	24.2	3.6
12/06/2005 12:00	-0.5	0.0	0.21	244.7	35.5	3.0
13/06/2005 12:00	-0.5	0.0	0.22	244.0	23.0	4.3
14/06/2005 12:00	0.3	0.0	0.22	220.0	39.4	3.5
15/06/2005 12:00	0.8	0.0	0.18	246.8	44.6	2.9

16/06/2005 12:00	0.9	0.0	0.21	235.7	48.1	2.9
17/06/2005 12:00	0.2	0.0	0.20	251.8	24.1	4.8
18/06/2005 12:00	1.3	0.0	0.23	249.6	19.7	4.4
19/06/2005 12:00	0.8	0.0	0.21	247.2	29.4	2.5
20/06/2005 12:00	-0.2	0.0	0.23	221.6	49.5	2.5
21/06/2005 12:00	-0.3	0.0	0.23	206.8	39.7	2.3
22/06/2005 12:00	-0.5	0.0	0.23	210.0	47.4	2.7
23/06/2005 12:00	-1.2	0.0	0.23	234.1	50.2	2.0
24/06/2005 12:00	-0.8	0.0	0.23	231.4	56.3	1.7
25/06/2005 12:00	-0.3	0.0	0.24	215.0	49.4	4.2
26/06/2005 12:00	-2.7	0.0	0.24	223.2	32.6	4.6
27/06/2005 12:00	-2.4	0.0	0.24	255.1	19.4	6.6
28/06/2005 12:00	-0.3	0.0	0.21	249.5	38.4	4.7
29/06/2005 12:00	1.2	0.0	0.23	248.7	41.7	2.5
30/06/2005 12:00	-0.4	0.0	0.24	243.7	38.9	2.6
01/07/2005 12:00	1.4	0.0	0.23	243.6	38.4	2.8
02/07/2005 12:00	2.5	0.0	0.21	241.3	52.8	2.2
03/07/2005 12:00	2.3	0.0	0.22	247.1	48.4	2.4
04/07/2005 12:00	1.9	0.0	0.23	248.5	45.6	2.8
05/07/2005 12:00	0.8	0.0	0.24	216.5	62.3	1.8
06/07/2005 12:00	0.6	0.0	0.24	212.7	66.1	1.6
07/07/2005 12:00	0.4	0.0	0.26	249.0	55.2	2.0
08/07/2005 12:00	0.8	0.0	0.26	216.9	55.1	2.2
09/07/2005 12:00	0.9	0.0	0.26	252.9	42.3	2.8
10/07/2005 12:00	0.1	0.0	0.25	263.1	31.1	2.7
11/07/2005 12:00	-0.5	0.0	0.25	265.6	31.3	2.1
12/07/2005 12:00	-0.2	0.0	0.25	269.7	21.8	2.3
13/07/2005 12:00	0.4	0.0	0.24	267.9	27.9	3.3
14/07/2005 12:00	0.3	0.0	0.23	264.2	37.3	2.6
15/07/2005 12:00	0.3	0.0	0.23	268.1	34.0	3.2
16/07/2005 12:00	-0.1	0.0	0.24	269.1	32.3	3.2
17/07/2005 12:00	-0.8	0.0	0.25	253.0	52.2	2.1
18/07/2005 12:00	-1.6	0.0	0.27	263.3	48.5	3.0
19/07/2005 12:00	-1.6	0.0	0.29	240.7	42.6	3.7
20/07/2005 12:00	-1.6	0.0	0.33	108.4	61.7	2.6
21/07/2005 12:00	-1.3	0.0	0.29	155.3	74.5	1.9
22/07/2005 12:00	-2.6	9.9	0.73	92.8	91.9	2.3
23/07/2005 12:00	-2.6	0.0	0.73	244.4	64.0	3.3
24/07/2005 12:00	-0.5	0.0	0.68	288.4	32.1	5.7
25/07/2005 12:00	-0.1	0.0	0.62	262.0	45.2	2.0
26/07/2005 12:00	-0.6	0.0	0.56	278.5	48.9	2.6
27/07/2005 12:00	0.6	0.0	0.52	230.5	46.7	2.3
28/07/2005 12:00	0.7	0.0	0.46	278.4	54.2	2.0
29/07/2005 12:00	0.9	0.0	0.40	241.3	59.3	1.5

30/07/2005 12:00	2.0	0.0	0.36	275.2	50.2	2.5
31/07/2005 12:00	2.6	0.0	0.36	280.9	43.1	2.4
01/08/2005 12:00	2.5	0.0	0.38	281.8	32.0	2.7
02/08/2005 12:00	2.1	0.0	0.38	286.4	23.8	2.3
03/08/2005 12:00	0.9	0.0	0.36	288.7	25.9	2.2
04/08/2005 12:00	0.5	0.0	0.36	287.1	37.6	2.6
05/08/2005 12:00	0.1	0.0	0.39	274.9	38.3	3.2
06/08/2005 12:00	-1.7	1.4	0.42	143.3	69.6	2.4
07/08/2005 12:00	-3.0	2.3	0.63	91.8	85.6	1.5
08/08/2005 12:00	-3.1	3.4	0.74	187.1	71.0	3.3
09/08/2005 12:00	-1.6	0.0	0.64	280.0	36.9	2.8
10/08/2005 12:00	0.0	0.0	0.54	272.1	32.8	2.8
11/08/2005 12:00	-0.4	0.0	0.46	274.1	44.9	2.0
12/08/2005 12:00	0.0	0.0	0.43	286.6	37.3	2.7
13/08/2005 12:00	1.1	0.0	0.41	282.2	34.7	2.7
14/08/2005 12:00	1.3	0.0	0.44	286.1	28.6	2.6
15/08/2005 12:00	0.8	0.0	0.42	277.0	42.3	2.1
16/08/2005 12:00	1.6	0.0	0.42	290.2	26.8	3.9
17/08/2005 12:00	0.0	0.0	0.42	291.7	34.0	3.4
18/08/2005 12:00	-0.4	0.0	0.39	283.1	54.0	2.5
19/08/2005 12:00	-0.7	0.0	0.38	225.7	67.7	2.3
20/08/2005 12:00	-0.7	0.0	0.43	166.0	70.7	2.3
21/08/2005 12:00	-0.4	0.0	0.41	277.2	53.7	2.9
22/08/2005 12:00	-0.6	0.0	0.43	190.7	58.1	2.9
23/08/2005 12:00	-0.4	0.0	0.40	300.1	21.1	3.3
24/08/2005 12:00	-1.5	0.0	0.39	230.0	58.5	2.5
25/08/2005 12:00	-0.8	0.0	0.37	255.2	64.1	2.9
26/08/2005 12:00	0.0	0.0	0.34	283.4	47.0	2.6
27/08/2005 12:00	1.3	0.0	0.35	305.6	32.2	4.1
28/08/2005 12:00	2.2	0.0	0.34	296.5	38.1	3.6
29/08/2005 12:00	2.4	0.0	0.32	307.8	19.2	3.9
30/08/2005 12:00	0.8	0.0	0.32	302.9	37.4	3.8
31/08/2005 12:00	0.1	0.0	0.34	280.9	54.4	2.3



Tabla A.2: Datos de entrada medidos en las estaciones en el glaciar Zongo, para el periodo 2005 a 2006.

Date	T (°C)	P (mm)	$\alpha$	G ( $W m^{-2}$ )	RH (%)	u ( $m s^{-1}$ )
01/09/2005	-1	0	0.38	308.8	57.4	2.3
02/09/2005	-0.3	0	0.37	268.6	63.4	1.7
03/09/2005	0.8	0	0.36	297.2	40.3	3.9
04/09/2005	0.6	0	0.32	320.2	33	3.8
05/09/2005	-0.2	0	0.33	271.5	53.3	2.2
06/09/2005	-0.5	0	0.36	170.2	67.1	2
07/09/2005	-2.6	1.4	0.47	118.6	86.4	1.8
08/09/2005	-2	1.1	0.54	120.2	82.7	2.1
09/09/2005	-2.5	4.7	0.74	87.8	84.4	2.7
10/09/2005	-1.5	4.1	0.68	140.6	81.8	2
11/09/2005	-2	8.5	0.83	111.5	84.8	2.3
12/09/2005	-2.6	4.1	0.89	107.9	91.3	3
13/09/2005	-3.2	3.4	0.85	123.6	91.7	5.8
14/09/2005	-3.1	7.5	0.84	123.4	89.4	2
15/09/2005	-3.2	5.9	0.9	132.1	86.4	2.5
16/09/2005	-2.7	0	0.89	188.9	87.6	1.9
17/09/2005	-2.8	6.2	0.9	149.6	84.4	2.2
18/09/2005	-3.1	1.6	0.85	184.8	88.6	1.4
19/09/2005	-3	0	0.86	169.4	85.2	1.7
20/09/2005	-2.7	0	0.81	182.8	89.4	2.1
21/09/2005	-1.4	3.2	0.75	202.6	90.1	2.3
22/09/2005	-1.3	0	0.75	180.4	83.5	2.2
23/09/2005	-0.1	0	0.7	270.2	78.6	2.1
24/09/2005	0.6	0	0.67	349.9	41.2	4.8
25/09/2005	0.1	0	0.67	350.9	39.5	3.1
26/09/2005	0.1	0	0.63	334.2	52.8	3.2
27/09/2005	0.8	0	0.58	343.7	52.6	2.5
28/09/2005	0.4	0	0.54	252	70	2.2
29/09/2005	1.6	0	0.47	244.3	68.8	3.7
30/09/2005	-1.7	7.9	0.67	111.4	92	2.5
01/10/2005	-0.9	2.1	0.78	194.2	80	2
02/10/2005	-0.1	0	0.68	175.4	75.1	1.8
03/10/2005	0.2	10.3	0.65	111.9	84.5	2.2
04/10/2005	1	0	0.84	166.9	77.5	2.3
05/10/2005	0.5	4.1	0.79	130.5	87.4	2.4
06/10/2005	0.5	8.5	0.79	146.7	81.6	1.9
07/10/2005	0.5	11.2	0.87	132.7	86.7	1.7
08/10/2005	0.1	14.4	0.9	141.4	92.7	1.6
09/10/2005	0	6.4	0.88	229.6	92.4	2.5
10/10/2005	0.1	6.6	0.92	148.2	84.3	1.9
11/10/2005	-0.2	0	0.85	159	84.8	1.8

12/10/2005	-0.1	4.1	0.85	160.9	74.6	2.2
13/10/2005	0	5.2	0.84	170.7	77.6	1.8
14/10/2005	0.6	0	0.76	236.5	55.2	2.8
15/10/2005	0	3	0.8	148.8	89.4	1.9
16/10/2005	0.2	1.6	0.84	128.1	91.3	2.2
17/10/2005	0.8	10.1	0.89	136.8	92.5	1.4
18/10/2005	0.6	7.9	0.81	159.6	88.2	1.8
19/10/2005	0.4	2.5	0.8	185	91.3	3.5
20/10/2005	0.7	1.2	0.77	158.6	83.3	3
21/10/2005	1.1	0	0.72	288.1	59	3.9
22/10/2005	0.3	0	0.75	190.3	70.9	2.3
23/10/2005	0.1	0	0.78	174.4	86	2.7
24/10/2005	1.3	6.9	0.75	244.6	81.4	3.2
25/10/2005	1.1	0	0.73	182.5	70	2.1
26/10/2005	0.8	2.7	0.76	165.2	82.9	2.1
27/10/2005	1.1	1.8	0.72	153.3	85.6	2.2
28/10/2005	1.9	0	0.62	293.2	62.8	2.4
29/10/2005	1.3	0	0.67	204.8	62.3	2.7
30/10/2005	1.1	0	0.62	330.5	69.7	2.9
31/10/2005	0.8	0	0.6	358.4	56	3.2
01/11/2005	1.4	0	0.55	398.2	29.4	3.2
02/11/2005	1.2	0	0.45	382.7	40.9	2.6
03/11/2005	1.3	0	0.34	320.9	40.4	2.5
04/11/2005	1.2	0	0.27	342.9	60.9	3.2
05/11/2005	0.9	0	0.29	240.4	72.1	2.6
06/11/2005	0.6	0	0.25	212.6	79.7	1.9
07/11/2005	-0.2	2.1	0.39	125.5	89.5	2
08/11/2005	-0.7	15.2	0.85	143.7	90.2	2.1
09/11/2005	0.1	0	0.77	141.3	91.8	1.7
10/11/2005	-0.3	9.5	0.8	148.2	84.2	2.1
11/11/2005	0.8	6.6	0.75	201.9	78.8	2.9
12/11/2005	-0.5	0	0.82	161.7	76.9	2.1
13/11/2005	0.7	1.6	0.75	211.9	75	1.6
14/11/2005	0.6	3.8	0.75	166.2	78.1	1.7
15/11/2005	0.8	2.1	0.68	257.4	84.1	2.4
16/11/2005	1.4	4.4	0.66	160.4	77	1.8
17/11/2005	1.5	0	0.53	166.7	79	2.3
18/11/2005	2.1	0	0.39	177.5	79.8	1.7
19/11/2005	0.5	9.6	0.85	154.2	88.6	1.8
20/11/2005	0.4	8.2	0.75	210.1	86.4	1.3
21/11/2005	0.5	13.4	0.7	172.6	88.2	1.8
22/11/2005	0.1	24	0.74	170.4	88.5	1.7
23/11/2005	0.7	0	0.8	328.2	62.3	5
24/11/2005	-0.1	2.3	0.86	106.8	69.8	2.6

25/11/2005	-0.4	11.8	0.93	138.2	90.8	1.4
26/11/2005	-0.4	13	0.92	175.8	92.2	2.1
27/11/2005	1	0	0.78	167	72.1	2.3
28/11/2005	3.4	0	0.72	231.9	60.7	2.3
29/11/2005	3.3	0	0.69	271.9	65.4	2.4
30/11/2005	1.6	0	0.68	277.5	77.4	2.4
01/12/2005	-0.1	3	0.69	264.5	74.8	2.4
02/12/2005	0.5	6.4	0.67	217.5	92	1.6
03/12/2005	0.9	0	0.65	120.8	91.3	2
04/12/2005	1.8	16.4	0.81	142.4	78.6	2.1
05/12/2005	2.8	2.7	0.69	173.6	70.6	3.1
06/12/2005	2.2	1.6	0.61	198.2	81.1	1.9
07/12/2005	0.3	12.3	0.75	258.3	78.2	1.9
08/12/2005	2.8	0	0.45	386.8	50.3	2.2
09/12/2005	2.1	0	0.21	346.9	64.9	2.1
10/12/2005	0.3	2.1	0.36	154.4	78.4	2.4
11/12/2005	0.1	22.2	0.82	245.9	81.3	1.3
12/12/2005	2	0	0.43	338.4	64.9	1.3
13/12/2005	2	0	0.16	249.3	74.9	3
14/12/2005	-0.1	11.5	0.24	172.3	88.2	2.2
15/12/2005	-0.5	4.5	0.87	170.5	89.3	1
16/12/2005	1	0	0.68	201.2	83	1.4
17/12/2005	1.6	3.4	0.57	320.4	79.9	2.1
18/12/2005	1.4	3.4	0.31	173.8	82.9	1.6
19/12/2005	2.5	0	0.16	311.9	48.9	2.8
20/12/2005	1.4	0	0.15	313.6	68.6	2.7
21/12/2005	2.2	1.4	0.26	298.5	73.4	1.2
22/12/2005	2.8	0	0.16	402	57.2	1.8
23/12/2005	2.4	0	0.15	288.9	61.8	1.5
24/12/2005	1.5	0	0.16	207.3	77.4	1.9
25/12/2005	0.1	0	0.16	195.2	87.3	1.8
26/12/2005	-0.9	23.7	0.88	196.2	92.8	2.3
27/12/2005	0.1	14.7	0.83	183.4	89.9	1.4
28/12/2005	0.3	19.9	0.81	206.3	87.6	1.4
29/12/2005	-0.3	22.7	0.89	183.8	92.9	1.6
30/12/2005	0.4	4.1	0.76	223.2	93	1.3
31/12/2005	0	0	0.82	123.9	89.3	1.9
01/01/2006	-0.1	14.1	0.9	126.3	84.6	1.9
02/01/2006	-0.7	33.8	0.95	143.9	87.5	2.1
03/01/2006	-0.5	5.9	0.82	229.1	86.4	1.9
04/01/2006	-0.3	6.6	0.84	189	91.5	1.2
05/01/2006	2	0	0.72	336.4	70.5	1.6
06/01/2006	1.6	0	0.7	338.1	50.9	2.4
07/01/2006	0.5	1.1	0.74	336.7	70.8	2.2

08/01/2006	2.1	0	0.7	371	58.7	2.2
09/01/2006	1.2	0	0.68	206.7	80	1.5
10/01/2006	2.2	0	0.65	303.7	72.5	2.5
11/01/2006	0	7.9	0.88	103.1	88.4	1.9
12/01/2006	-0.3	24	0.91	197.2	91.4	1.9
13/01/2006	0	19.9	0.91	148.4	92.5	1.7
14/01/2006	0.2	30.8	0.87	134.7	94	1.1
15/01/2006	-0.5	34.3	0.92	231.5	90.9	1.9
16/01/2006	-0.5	28.8	0.87	154.8	94.1	2.1
17/01/2006	-1.3	3.4	0.85	237.1	91.7	2.5
18/01/2006	-0.9	17.5	0.9	136.1	92.8	1.6
19/01/2006	-0.1	0	0.88	258.6	78.4	2.6
20/01/2006	-0.5	8.9	0.84	167.5	90	1.8
21/01/2006	-0.5	11	0.88	130.7	93.4	1.6
22/01/2006	-0.2	13.4	0.83	222.6	93.7	2.5
23/01/2006	0.9	5.5	0.79	203.1	91.6	2.2
24/01/2006	0.4	8.9	0.86	179.6	92.9	1.9
25/01/2006	-0.6	52.7	0.95	266.5	91.3	1.4
26/01/2006	-0.1	18.1	0.95	238.9	91.1	1
27/01/2006	-0.6	48.6	0.95	214.4	87.6	1.5
28/01/2006	-0.1	7.7	0.82	245.2	78.7	1.6
29/01/2006	0.1	4.1	0.79	262.3	81.2	1.9
30/01/2006	0.1	13	0.88	176.8	82.5	1.3
31/01/2006	0	2.1	0.95	160.5	80.7	1.7
01/02/2006	0.9	1.9	0.95	204.1	86	1.8
02/02/2006	0.1	10	0.95	228.4	90.3	1.4
03/02/2006	1.5	0	0.55	235.7	81.2	1.5
04/02/2006	2.1	0	0.7	254.2	80.9	2
05/02/2006	1.5	0	0.75	153.2	81.5	1.8
06/02/2006	0.2	8.2	0.75	151.4	87.6	1.3
07/02/2006	0.1	3.7	0.73	181.9	91.1	1.2
08/02/2006	0.5	9.6	0.86	96.8	92.3	0.9
09/02/2006	0.7	9	0.77	132.3	94.4	1.9
10/02/2006	-0.5	43.6	0.95	195.6	92.1	1.5
11/02/2006	0.4	10.5	0.78	181.2	87.2	1
12/02/2006	0.8	16.4	0.82	215.8	86.4	2.7
13/02/2006	0	12.3	0.83	168.2	78.8	3.7
14/02/2006	-0.8	6.9	0.77	245.6	72.1	3.2
15/02/2006	1.1	0	0.68	344.1	58	3.1
16/02/2006	0.7	0	0.72	193.1	74.1	2.5
17/02/2006	0	0	0.71	229.4	84.6	1.7
18/02/2006	0.2	1.6	0.69	207.7	90.3	1.6
19/02/2006	0.2	2.7	0.72	195.4	87.2	1.5
20/02/2006	0.4	7.3	0.73	266.5	80.8	2.3

21/02/2006	0.8	1.6	0.73	175.7	86.8	2.1
22/02/2006	2.4	0	0.65	235	76.9	1.8
23/02/2006	2.9	8.2	0.65	191.1	74.1	2.3
24/02/2006	1.8	4.4	0.68	171.6	73	2.5
25/02/2006	1.4	4.8	0.76	140.7	75	1.9
26/02/2006	3	0	0.66	205.4	60	1.7
27/02/2006	3.9	0	0.62	352.5	41.7	2.6
28/02/2006	2.4	0	0.65	242.9	61.9	2
01/03/2006	1.6	0	0.66	159.7	83	2.1
02/03/2006	2.6	11.8	0.66	202.8	84.4	2
03/03/2006	0.2	6.6	0.95	137.1	83.8	2
04/03/2006	0.6	5.2	0.78	158.1	93	1.6
05/03/2006	1	7.8	0.76	185.5	87.3	1.5
06/03/2006	3.6	0	0.68	291.7	66.1	2
07/03/2006	4.1	0	0.63	357.7	38.3	2.2
08/03/2006	5.7	0	0.64	346.4	38.2	2.2
09/03/2006	3.7	0	0.64	341	60.5	2.5
10/03/2006	1.4	4.1	0.72	192.6	83.9	2.1
11/03/2006	1.7	15.1	0.73	311.1	65.8	1.7
12/03/2006	1.9	4.4	0.64	234	63.9	2.6
13/03/2006	2.1	0	0.77	281.6	72.1	2.4
14/03/2006	1.1	1.8	0.73	204.8	80.6	2
15/03/2006	-0.2	2.9	0.8	104.5	90.8	1.7
16/03/2006	0.8	1.2	0.69	133.1	85.7	1.4
17/03/2006	2	0	0.62	240.4	76.7	1.6
18/03/2006	-0.1	8.6	0.83	145.7	83.7	1.6
19/03/2006	0.5	1.8	0.72	171.6	81.8	2.8
20/03/2006	-0.1	12.3	0.81	133.3	91.4	1.5
21/03/2006	-0.2	1.5	0.83	116.2	92.4	1.5
22/03/2006	0.3	18.1	0.93	128.4	90.8	0.9
23/03/2006	0.5	0	0.77	166.6	91.5	2.2
24/03/2006	0.1	13	0.93	117.8	91.5	1
25/03/2006	-0.2	6.2	0.27	140.5	89.3	2.4
26/03/2006	0	7.8	0.83	149.9	92.2	1.2
27/03/2006	0.9	6	0.8	148.3	88.2	1.3
28/03/2006	0.7	1.4	0.71	141	90.2	1.7
29/03/2006	0	24.7	0.89	117.9	90.9	1.3
30/03/2006	0.3	5.1	0.81	136.5	88	1.4
31/03/2006	0.1	3.4	0.86	117.7	90.9	2.5
01/04/2006	-0.5	7.9	0.51	81.6	90	0.6
02/04/2006	-0.5	2.5	0.23	180.8	88.1	0.3
03/04/2006	0.1	1.1	0.21	129.8	87.7	0.5
04/04/2006	0.2	13.7	0.36	103.4	89.8	0.7
05/04/2006	0.4	0	0.22	142.6	91.1	0.9

06/04/2006	0.1	7.5	0.23	136.6	90.9	1.1
07/04/2006	0.7	0.7	0.23	142	81	1.3
08/04/2006	2.4	0	0.28	226.1	60.7	1.5
09/04/2006	1.8	0	0.33	246.5	60.8	1.7
10/04/2006	2.4	0	0.35	200.7	63.1	2
11/04/2006	2.6	0	0.39	298	51.3	2.2
12/04/2006	2	0	0.4	310.8	38.8	2.4
13/04/2006	2	0	0.39	233.8	52.3	2.6
14/04/2006	-0.3	8.1	0.45	123.8	89	2.8
15/04/2006	-0.9	9.9	0.79	125.5	91.1	3
16/04/2006	-0.3	19.5	0.26	119.8	89.4	3.2
17/04/2006	2.4	0	0.24	251.2	66.8	3.4
18/04/2006	3	0	0.33	254.5	60.5	2.8
19/04/2006	2.3	0	0.74	176.7	45.3	3.1
20/04/2006	2.9	0	0.71	266.9	38.6	3.2
21/04/2006	3.1	0	0.69	260.8	37.6	2.2
22/04/2006	1.9	0	0.68	252.3	44.7	1.9
23/04/2006	1	0	0.67	271.9	37.4	2.7
24/04/2006	0.5	0	0.66	246.6	51.8	2.3
25/04/2006	1.2	1	0.66	210.2	34.1	2.3
26/04/2006	-0.9	0	0.75	122.6	72.3	1.8
27/04/2006	0.4	0	0.71	177.1	57.5	2.1
28/04/2006	0.6	0	0.69	243.1	54.9	2.1
29/04/2006	1.4	0	0.68	179.1	44.1	2.8
30/04/2006	0.3	0	0.69	212.1	53	1.9
01/05/2006	0.2	0	0.66	262.1	50.2	1.5
02/05/2006	0.6	0	0.65	201.3	55.1	1.7
03/05/2006	1.1	0	0.64	196.5	35.5	1.9
04/05/2006	0.4	5.5	0.7	150.2	56.3	1.9
05/05/2006	-0.1	0	0.86	207.2	61.4	3.1
06/05/2006	0.4	0	0.77	229.7	48.4	3.1
07/05/2006	0	0	0.72	259.8	34	4.3
08/05/2006	0.6	0	0.67	246.9	29.7	3.3
09/05/2006	1.7	0	0.64	233.8	37	2.4
10/05/2006	-0.2	0	0.61	247.7	40.1	2.1
11/05/2006	-1.3	0	0.57	249.6	39.7	2.1
12/05/2006	-0.4	0	0.49	246.9	36.2	2.5
13/05/2006	0.2	0	0.43	248.8	32	2.6
14/05/2006	1.2	0	0.37	243.9	28.9	2.5
15/05/2006	1.2	0	0.36	239.9	32.6	2.1
16/05/2006	2	0	0.38	241.9	37.5	2.9
17/05/2006	1.4	0	0.34	212.7	42.4	2.8
18/05/2006	1.4	0	0.32	241.4	38.8	2.1
19/05/2006	0.7	0	0.33	248.7	22.2	4.8

20/05/2006	0.9	0	0.29	247	14.1	5.5
21/05/2006	-0.1	0	0.26	243	20.2	3.5
22/05/2006	-0.8	0	0.26	242.8	20.3	3.6
23/05/2006	-0.6	0	0.27	247.5	15.4	3.9
24/05/2006	1.5	0	0.28	240.9	22.1	3.1
25/05/2006	1.5	0	0.32	241.1	21.7	3.7
26/05/2006	1.7	0	0.38	243.1	10.1	2.4
27/05/2006	0.4	0	0.4	243.7	14.1	3.2
28/05/2006	0.4	0	0.4	240.2	21.6	3
29/05/2006	0.3	0	0.38	237.2	27	2.4
30/05/2006	-0.1	0	0.39	217.6	31.2	2.1
31/05/2006	-0.6	0	0.41	209.9	49.8	2.5
01/06/2006	-1.3	0.8	0.48	76.1	77.4	1.5
02/06/2006	-0.8	4.2	0.65	115.9	81.5	2
03/06/2006	-0.2	0	0.72	223.9	49.4	2.6
04/06/2006	-0.9	0	0.64	167.8	46.2	2.2
05/06/2006	0.1	0	0.57	234.9	14.5	3.5
06/06/2006	0.3	0	0.5	229.5	27.4	2.4
07/06/2006	0.5	0	0.45	211.4	39.2	2.4
08/06/2006	0.7	0	0.43	182.1	43.6	3.5
09/06/2006	0.1	0	0.41	183.8	47	3.3
10/06/2006	0.1	0	0.41	195.8	59.7	2.6
11/06/2006	-1.9	0	0.44	79.5	86.9	1.6
12/06/2006	-2.1	0	0.52	88.3	84.8	1.8
13/06/2006	-0.4	0	0.48	231	49.6	2.7
14/06/2006	0.6	0	0.44	226.4	27.1	2.9
15/06/2006	0.7	0	0.43	228.2	23.1	3.2
16/06/2006	0.6	0	0.42	226.6	27.6	2.7
17/06/2006	1.5	0	0.41	231.7	13.5	3.7
18/06/2006	1.2	0	0.42	231.7	18.2	2.7
19/06/2006	1	0	0.41	226.6	18.7	3.5
20/06/2006	0.9	0	0.39	220.1	26.2	2.1
21/06/2006	0.3	0	0.37	219.2	39.5	2.1
22/06/2006	-0.2	0	0.4	207.2	54.8	2.1
23/06/2006	-0.6	0	0.44	150.8	41.3	2.5
24/06/2006	-1.6	0.7	0.65	122.7	59.8	3.7
25/06/2006	-0.9	0	0.6	176.2	26.9	3.2
26/06/2006	-1.1	0	0.55	210.5	41	1.9
27/06/2006	-1.7	0	0.58	97.7	51.2	2.3
28/06/2006	-0.9	0	0.5	175	44.4	2.9
29/06/2006	-1	0	0.45	218.8	54.1	3.5
30/06/2006	0.8	0	0.4	233.7	28.6	3.1
01/07/2006	1.4	0	0.42	235.1	24.8	3.2
02/07/2006	-0.2	0	0.42	220.6	42.1	2.7

03/07/2006	-0.2	0	0.42	230.4	31.6	2.8
04/07/2006	0.2	0	0.43	234.5	19.4	2.8
05/07/2006	-0.4	0	0.42	225.8	21.7	2.9
06/07/2006	0.5	0	0.43	228.9	24.1	2.6
07/07/2006	0.3	0	0.38	231.5	28.6	3.6
08/07/2006	-0.9	0	0.39	240.2	27.7	2.9
09/07/2006	-0.3	0	0.42	237.9	28.8	3.2
10/07/2006	-0.5	0	0.44	191.5	39.6	2.8
11/07/2006	-0.5	0	0.46	202.4	43.5	2.8
12/07/2006	0.1	0	0.46	235.9	24.4	4.3
13/07/2006	0.6	0	0.45	231	35.2	2.8
14/07/2006	-1	0	0.49	178.4	57.8	2.2
15/07/2006	-2.2	0.7	0.59	121.2	68.3	1.8
16/07/2006	-0.4	0	0.64	231.1	44.9	3.2
17/07/2006	-0.9	0	0.56	227.6	42.2	2.3
18/07/2006	-0.6	0	0.5	236.4	38.2	2.5
19/07/2006	-0.8	0	0.47	245.8	28.9	2.4
20/07/2006	0.5	0	0.46	240.8	17.7	2.6
21/07/2006	0	0	0.45	240.1	32.1	2.9
22/07/2006	0.8	0	0.46	243	29.3	2.5
23/07/2006	0.5	0	0.46	236	40.8	2.2
24/07/2006	0.4	0	0.48	242.7	35	3.7
25/07/2006	0	0	0.49	243.5	42.1	3
26/07/2006	0.1	0	0.48	235.4	49.6	2.3
27/07/2006	-0.1	0	0.48	197.2	61.3	1.7
28/07/2006	0.2	0	0.55	187.4	51.8	3.6
29/07/2006	-0.9	0	0.6	119.2	71	2.2
30/07/2006	1.3	0	0.51	237.6	43.7	3.2
31/07/2006	1.3	0	0.49	241.1	45.7	3.2
01/08/2006	0.7	0	0.46	229.9	47	1.9
02/08/2006	0.6	0	0.44	216.3	44.8	2.5
03/08/2006	0.8	0	0.42	256.4	39.1	2.3
04/08/2006	0.9	0	0.4	258.6	43.6	2.4
05/08/2006	1	0	0.36	256	43.1	2.2
06/08/2006	-0.3	0	0.38	211.7	46.3	2.1
07/08/2006	0.7	0	0.38	255.3	37.9	3.7
08/08/2006	0.9	0	0.36	228.9	30.4	2.5
09/08/2006	0.2	0	0.35	259	31.6	4
10/08/2006	-0.8	1.4	0.36	182.9	46	2.7
11/08/2006	-1.6	0	0.54	175	53.1	2.8
12/08/2006	-0.2	1.4	0.43	179.6	65.2	2.1
13/08/2006	0.6	0	0.52	162	67.4	2.2
14/08/2006	0.3	1.4	0.41	178.4	73.4	2
15/08/2006	-1.2	13	0.48	79.4	79.5	1.8



16/08/2006	-2	0	0.84	163.8	78.9	3
17/08/2006	-2.5	0	0.76	217.4	78.3	2.1
18/08/2006	-2.8	0	0.76	144.9	79	1.8
19/08/2006	-1.8	0	0.7	150.4	60	2.6
20/08/2006	-1	0	0.63	204.5	50.2	2.3
21/08/2006	-1	0	0.59	232.3	63.8	2.6
22/08/2006	-0.8	0	0.55	273.6	48.4	4.2
23/08/2006	-2.2	0	0.51	201.2	65.6	1.6
24/08/2006	-2.1	1.4	0.52	151.8	75.6	2.6
25/08/2006	-0.3	0	0.68	287	53.6	5.3
26/08/2006	0.7	0	0.49	260.3	33.3	3.1
27/08/2006	1.9	0	0.37	286.5	37.9	3.1
28/08/2006	-1.4	0	0.41	120.8	78.6	2.2
29/08/2006	-0.7	3.7	0.63	128.5	85.4	1.7
30/08/2006	-0.1	0.7	0.55	166.7	74.1	4
31/08/2006	-0.2	0	0.55	217.5	62.1	2.3

---



## A.2. Código del Modelo de índice de temperatura mejorado (ETI) y Modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) para los años 2004-2006

```

##=====
# AGOSTO 1 2020
#abrir solo con R versión 3.5.1 para adelante
#MODELO DE INDICE DE TEMPERATURA MEJORADO ETI- PARA
#BALANCE DE MASA Y ESCURRIMIENTO PARA GLACIARES, EN LUGARES DE TOPOGRAFIA
MOUNTAIN
#Facultad de Ingeniería Civil, Instituto de hidráulica e Hidrología (IHH)- UMSA
# Interactivo los valores de los datos
##=====
#install.packages("xlsx")
# %%% 2021 %%%
#FR----- bibliotecas,paquetes
library(ggplot2) # install.packages('ggplot2') #FR
library(xlsx) #install.packages('xlsx') paquete excel
#FR-----Ejecutar para unicos valores
#xFR1=0.19
#xFR2=0.00087
#xFR3=0.19
#xFR4=0.00087
#FR-----Ejecutar para varios valores 2021 %%%
xFR1=seq(0.002,0.190,length.out=5) #TF_wet #TF (-0.024 - 0.192) [cm d-1 °C-1] 2009 C
xFR2=seq(0.0009,0.0254,length.out=5) #SRF_wet #SRF (0.0211 - 0.0254) [cm m2 d-1 W-1]
xFR3=seq(0.002,0.190,length.out=5) #TF_dry #TF (-0.002 - 0.009) [cm d-1 °C-1] 2008 P
xFR4=seq(0.0009,0.0254,length.out=5) #SRF_dry #SRF (0.00087 - 0.0107) [cm m2 d-1 W-1]
#FR -----directorios
#dirBFR="E://PROGRAMACION R/ETI_45/ETI_" #directorio base (no cambia en este caso
particular):ETI 2004-2005
dirBFR="E://PROGRAMACION R/ETI_56/ETI_" #directorio base (no cambia en este caso
particular):ETI 2005-2006
ids="2E" #identificador stake 1H,1K,1N,2E
elevFR=5134 #elevación stake 5186,5200,5168,5134
scFR=15 #columna de stake 1,2,4,15
idst="O" #identificador sombreado topográfico C CS SA SR; para ETI: O
#FR-----Arrays adicionales
yFR1=array(NA,c(length(xFR1),length(xFR2),length(xFR3),length(xFR4))) #mae
yFR2=array(NA,c(length(xFR1),length(xFR2),length(xFR3),length(xFR4))) #bias
yFR3=array(NA,c(length(xFR1),length(xFR2),length(xFR3),length(xFR4))) #rms
MFR=array(NA,c(length(xFR1)*length(xFR2)*length(xFR3)*length(xFR4),7+1)) #Matriz para Excel
jFR=1 #contador
#FR-----
for (iFR4 in 1:length(xFR4)) {
for (iFR3 in 1:length(xFR3)) {
for (iFR2 in 1:length(xFR2)) {
for (iFR1 in 1:length(xFR1)) {
MFR[jFR,1]=xFR1[iFR1] #col1=TF_wet
MFR[jFR,2]=xFR2[iFR2] #col2=SRF_wet
MFR[jFR,3]=xFR3[iFR3] #col3=TF_dry
MFR[jFR,4]=xFR4[iFR4] #col4=SRF_dry

```

```

#FR----- inicio programación previa:
# %%% 2021 %%%
## DEFINE INPUTS ##
# Los datos csv deben estar llenos sin NA caso contrario no correrá el código bien
# # DEFINE DIRECTORY PATH (path to folder containing all .R TopoSol files)
# dirpath = "E://PROGRAMACION R/SETI_56/SETI_1H_56/" #you should creat a file in the disc
# #setwd("E:\\PROGRAMACION R\\SETI_2G")
# # DEFINE CSV (file Excel delimitado por comas)
# # import date csv
# datos<-read.csv("E://PROGRAMACION R/SETI_56/SETI_1H_56/dato05061HC.csv", sep=",",
header=TRUE, skip=0) #cambiar nombre dato0405C
# #Se sacaran los datos de la hoja Excel de la estación en estudio
# # will save output
# save_path = "E://PROGRAMACION R/SETI_56/SETI_1H_56/" #cambiar nombre de carpeta
"salida11k"
#.....
##### 2021 #####
#dirpath = paste(dirBFR,ids,"_45/",sep="") #FR modificación: ETI 2004-2005
dirpath = paste(dirBFR,ids,"_56/",sep="") #FR modificación: ETI 2005-2006
#datos<-read.csv(paste(dirpath,"dato0405",ids,idst,".csv",sep=""), sep=",", header=TRUE, skip=0)
#FR modificación: ETI 2004-2005
datos<-read.csv(paste(dirpath,"dato0506",ids,idst,".csv",sep=""), sep=",", header=TRUE, skip=0)
#FR modificación: ETI 2005-2006
save_path = dirpath #FR modificación
##### 2021 #####
#datos
elev_AWS<-5050 #elevación en la morrena &
elev_plataformacorre<-4750 #plataforma corregida &
elev_AWSglacier<-5050 #elevación en el glaciar &
#.....
elevation <- elevFR #FR modificación
# 7N 5072,8N 5064
#.....
tctemp_dry<-0.48
tctemp_wet<-0.48
PHG_dry<-0
PHG_wet<-0
e_o<-6.11 # (hPa) Presión de vapor de saturación de hielo derretido
tt_wet<-0.4
tt_dry<-1
T_crit<-1.5
dia_nevada<-(-2) #interactive &
alpha_firn<-0.5 #Albedo característico para firn
alpha_frsnow<-0.8 #Albedo característico para la nieve fresca
t_days<-10 #e-folding constante para el efecto del envejecimiento en el albedo de la
nieve que determina que tan rápido el albedo de la nieve se acerca al abeto albedo después de
una nevada.
alpha_ice<-0.3 #Albedo característico para el hielo

```

```

depth<-0.6          #Constante de plegado electrónico para el efecto de la profundidad de la
nieve sobre el albedo.
e<-2.71828182845905
# analizar valores

TF_wet<-xFR1[iFR1] #FR modificación
SRF_wet<-xFR2[iFR2] #FR modificación
TF_dry<-xFR3[iFR3] #FR modificación
SRF_dry<-xFR4[iFR4] #FR modificación

#TF_wet<-(0.001)   #TF (-0.024 - 0.192) [cm d-1 °C-1] 2009 C
#SRF_wet<-(0.0087) #SRF (0.0211 - 0.0254) [cm m2 d-1 W-1]

#TF_dry<-(0.001)  #TF (-0.002 - 0.009) [cm d-1 °C-1] 2008 P
#SRF_dry<-(0.0087) #SRF (0.00087 - 0.0107) [cm m2 d-1 W-1]

# Cálculos previos para calcular la temperatura
deltaT_dry=(tctemp_dry*(elev_AWS-elevation)/100) #(deltaT celcius)
deltaP_dry=(PHG_dry*(elevation-elev_plataformacorrec)/100) #(%)
deltaT_wet=(tctemp_wet*(elev_AWS-elevation)/100) #(deltaT celcius)
deltaP_wet=(PHG_dry*(elevation-elev_plataformacorrec)/100) #(%)
#-----
#calculamos la planilla de extrapolación con los siguientes cálculos de columnas y filas
#-----
# Las funciones estarán en ingles ojo!
#calculamos la temperatura (grados Celcius) T=T+deltaT
Temperature<- function(datos,deltaTdry){
  Temp=(datos+deltaTdry)
}
Temperatura<-as.data.frame(Temperature(datos[,1],deltaT_dry))
datos[,1]<-Temperatura[,1]
names(Temperatura[,1])<-c("T(C)")

# calculo de la precipitación (cm) P=(P/10)*(1+deltaP)
Precipitation<-function(datoscol,deltaPwet){
  Precip=((datoscol/10)*(1+deltaPwet))
}
Precipitacion<-as.data.frame(Precipitation(datos[,2],deltaP_wet))
names(Precipitacion)<-c("P(cm)")
datos[,2]<-Precipitacion
Temperatura[,2:3]<-datos[,5:6]

# -----
# Cálculos de la planilla de sublimación
#-----
#calculamos la columna de presión de vapor de saturación de la temperatura T
#e_s=Presión de vapor de saturación para la temperatura T

```

```

#es(i)=SI(Ti>=0,eo*10^(7.5*Ti/(237+Ti)),eo*10^(9.5*Ti/(265+Ti))) #svpt=saturación vapor pressure
for temperatura
saturation_vapor_pressure<-function(svpt,eo){
  L<-length(svpt)
  es<-as.data.frame(svpt) #artificio para tener un vector de la misma longitud
  for (i in 1:L){
    if(svpt[i]>=0) {es[i]<-eo*10^((7.5*svpt[i])/(237+svpt[i]))}
    else {es[i]<-eo*10^((9.5*svpt[i])/(265+svpt[i]))}
  }
  es
}
e_s<-as.data.frame(saturation_vapor_pressure(Temperatura[,1],e_o))
names(e_s)<-c("e_s(hPa)")
# && operador logico and (y)
#snowfall<-vector("character",L) #crear vector de longitud L sin datos
Temperatura[,4]<-e_s[,1]

#"ea [HPa]" calculo de la columna de la presion de vapor
#e_a=Presure de vapor
#ea(i)=es(i)*RH(i)/100
vapor_pressure<-function(vpt2,vpt4){
  ea<-as.data.frame((vpt2*vpt4)/100)
  ea
}
e_a<-as.data.frame(vapor_pressure(Temperatura[,2],Temperatura[,4]))
names(e_a)<-c("e_a(hPa)")
Temperatura[,5]<-e_a[,1]

# cálculo de la sublimación s(mm w e)
#s(i)=SI(T(i)>Tt_wet,0.28*u(i)*(ea(i)-eo),0.24*u(i)*(ea(i)-es(i)))
Sublimation<-function(temperatura1,ttwet,tempera3,tempera5,e,tempera4){
  k<-length(temperatura1)
  subli<-vector('numeric',k)
  for (i in 1:k){
    if(temperatura1[i]>ttwet) {subli[i]<-0.28*tempera3[i]*(tempera5[i]-e)}
    else {subli[i]<-0.24*tempera3[i]*(tempera5[i]-tempera4[i])}
  }
  subli
}
sublimacion<-as.data.frame(Sublimation(Temperatura[,1],tt_wet,Temperatura[,3],
Temperatura[,5],e_o,Temperatura[,4]))
names(sublimacion)<-c("s(mm w.e)")
# CALCULO DE LA SUBLIMACION EN CM (s [cm.w.e])
# s(i)[cm]=s(i)[mm]/10
s_cm.w.e=sublimacion/10
# We accommodate the results to the new table.
Temperatura[,6]<-sublimacion[,1]
Temperatura[,7]<-s_cm.w.e[,1]

```

```

Melt.Mass_balance<-as.data.frame(Temperatura[,1])
Melt.Mass_balance[,2]<-datos[,2]
#-----
# melting sheet and mass balance ( Melt. Mass. balance)
#-----
# cálculo de la columna de la nevada (snowfall)
  #snowfall<-vector("character",L) create vector of length L without data.
#snowfall(i)=SI(Y(T(i)<Tcrit,P(i)>0),"Snowfall","")
Snowfall<-function(dat2,mmb,tcrit){
  L<-length(dat2)
  snowfall<-vector("character",L)
  for (i in 1:L){
    if(mmb[i]<tcrit && dat2[i]>0) {snowfall[i]<-"snowfall"}
  }
  snowfall
}
snowfall<-as.data.frame(Snowfall(datos[,2],Melt.Mass_balance[,1],T_crit))
Melt.Mass_balance[,3]<-snowfall[,1]

# calc of a_s (nevada) cm d^-1
#as(i)=SI(snowfall(i)="Snowfall",P(i),0)
snowfall_as<-function(Mb2,Mb3){
  L<-length(Mb2)
  as<-vector('numeric',L)
  for (i in 1:L){
    if(Mb3[i] == "snowfall") {as[i]<-Mb2[i]}
    else {as[i]<-0}
  }
  as
}
a_s<-as.data.frame(snowfall_as(Melt.Mass_balance[,2],Melt.Mass_balance[,3]))
names(a_s)<-c("a_s(cm d^-1)")
Melt.Mass_balance[,4]<-a_s[,1]

# calculo de la columna de l = número del día en que ocurrió la ultima nevada
#columna 5 de la tabla de r
last_snowfall<-function(mmb1,tcrit,dt2){
  Ls<-length(mmb1)
  l<-vector('numeric',Ls)
  a<--2 #contador que depende de snowfall
  for (i in 1:Ls){
    if(mmb1[i]<tcrit && dt2[i]>0) {l[i]<-0
      a<--1}
    else{l[i]<-(a)
      a<-a-1}
  }#Colocar un bucle para condición cuando sea snowfall
  l
}

```

```

l_d<-as.data.frame(last_snowfall(Melt.Mass_balance[,1],T_crit,datos[,2]))
names(l_d)<-c("l(dia)")
Melt.Mass_balance[,5]<-l_d

# cálculo de alpha_snow= albedo del sitio del glaciar cubierto de nieve en el día
#alpha_snow (sacamos los valores, albedo, alpha, G)
Melt.Mass_balance[,6]=as.numeric(alpha_firn+((alpha_frsnow-
alpha_firn)*as.numeric(as.numeric(exp((as.numeric(Melt.Mass_balance[,5])/as.numeric(t_days))))
)))

# claculo de G (w m^2) sacamos de los datos
Melt.Mass_balance[,7]<-datos[,4]
#####
#calc de la columna M cmd^-1
#También podemos omitir los nombres de los argumentos si mantenemos la correspondencia
#con el orden o posición de los argumentos en el que damos los valores:
#ver el orden
Modelling_melt <- function(
depth,alphaice,MMb6,MMb1,ttwet,TFwet,SRFwet,MMb7,TFdry,SRFdry,
MMb2,scm.w.e){
#columna 8 y 9 y 10 y 11 revisar con ese for y bucle
L<-length(Temperatura[,1])
alpha<-vector('numeric',L)
SWE<-rep(NA, times= L) #creamos vector SWE de longitud L con NAs
SWE[1]<-1 #como valor inicial de SWE para calc alpha

#creamos otro SWE' para comparacion y otro PRUEBA
SWE.prueba<-rep(NA, times= L)
prueba<-vector('character',L)

#Calculo primera fila: alpha .....
{if (SWE[1]<=3*depth) {(MMb6[1]
+(alphaice-MMb6[1])*exp((-SWE[1]/depth)))->alpha[1]} else
{MMb6[1]->alpha[1]}
}
# desde aquí empieza el solver para la función
M<-rep(NA, times= L) #creamos vector M de longitud L con NAs
for(i in 1:L) {
if (i <= 181) {
if (MMb1[1]>ttwet) {
(TFwet*MMb1[1]+SRFwet*(1-alpha[1])*
MMb7[1])->M[1]
}
else
{
M[1]<-0
}
}
}
}

```



```

else{
  if (MMb1[1]>ttwet) {
    (TFdry*MMb1[1]+SRFdry*(1-alpha[1])*
     MMb7[1])>M[1]
  }
  else
  {
    M[1]<-0
  }
}
M
}

ice_melt<-rep(NA, times= L) #creamos vector Ice melt de longitud L con NAs
ice_melt[1]<-0#como valor inicial de SWE para calc alpha
for (i in 2:L) {

if (MMb1[i]>ttwet)
{
#se sigue la secuencia SWE -> alpha -> M
#cálculo de SWE
SWE[i]<-0
#cálculo de alpha
if (SWE[i]<=3*depth)
{(MMb6[i]
 +(alphaice-MMb6[i])*
  exp((-SWE[i]/depth)))->alpha[i]}
else {MMb6[i]->alpha[i]}

#cálculo de M, eliminamos la condición porque ya cumplió en la primera condición
if(i<=181){
  (TFwet*MMb1[i]+SRFwet*
   (1-alpha[i])*MMb7[i])>M[i]
}
else
{
  (TFdry*MMb1[i]+SRFdry*
   (1-alpha[i])*MMb7[i])>M[i]
}

#cálculo de SWE para prueba
if((SWE[i-1]+MMb2[i])>(M[i]-scm.w.e[i]))
{SWE.prueba[i]<-SWE[i-1]+MMb2[i]-(M[i]-scm.w.e[i])}
else {SWE.prueba[i]<-0}

#llenamos el vector prueba
if(SWE[i] == SWE.prueba[i]) {prueba[i]<-""}
else {prueba[i]<- "ESTA MAL"}
}
}

```

```

}
else {
  #se sigue la secuencia M -> SWE -> alpha
  #calculo de M
  M[i]<-0

  #calculo de SWE
  if((SWE[i-1]+MMb2[i])>(M[i]-scm.w.e[i]))
  {SWE[i]<-SWE[i-1]+MMb2[i]-(M[i]-scm.w.e[i])}
  else {SWE[i]<-0}

  #calculo de alpha
  if (SWE[i]<=3*depth)
  {(MMb6[i]
  +(alphaice-MMb6[i])*
  exp((-SWE[i]/depth)))->alpha[i]}
  else {MMb6[i]->alpha[i]}

}

}
cbind(ice_melt,alpha,M,SWE) #usamos cbind para que la salida sea solo un objeto tipo para asi
poder
# guardar este objeto al usar la funcion Modelling_Melt
}
salida <-
as.data.frame(Modelling_melt(depth=depth,alphaice=alpha_ice,MMb6=Melt.Mass_balance[,6],
MMb1=Melt.Mass_balance[,1],ttwet=tt_wet,TFwet=TF_wet,
SRFwet=SRF_wet,MMb7=Melt.Mass_balance[,7],TFdry=TF_dry,
SRFdry=SRF_dry,MMb2=Melt.Mass_balance[,2],scm.w.e=s_cm.w.e[,1]))

# Se asignaran la posicion de las respectivas filas en el Melt.Mass_balance
alpha.<-as.data.frame(salida$alpha)
names(alpha.)<-c("alpha")
Melt.Mass_balance[,8]<-alpha.

M.<-as.data.frame(salida$M)
names(M.)<-c("M")
Melt.Mass_balance[,9]<- M.
SWE.<-as.data.frame(salida$SWE)
names(SWE.)<-c("SWE")
Melt.Mass_balance[,10]<-SWE.
Melt.Mass_balance[,11]<-s_cm.w.e[,1]
names(Melt.Mass_balance[,11])<-c("s(cm w e)")

# Cálculo de la columna Ice melt (cm d^-1) derretimiento del hielo
Initial_ice_melt<-function(mmb10,mmb4,mmb9,mmb11){
  L<-length(mmb4)

```

```

Ice_melt<-vector('numeric',L) #creamos vector SWE de longitud L con NAs SWE<-rep(NA,
times= L)
Ice_melt[1]<-0
for (i in 2:L) {
  if(mmb10[i-1]+mmb4[i]< mmb9[i]-mmb11[i])
    {Ice_melt[i]<-mmb9[i]-mmb11[i]-(mmb10[i-1]+mmb4[i]) }
  else{Ice_melt[i]<-0 }
}
Ice_melt
}
Ice_melt<-
as.data.frame(Initial_ice_melt(Melt.Mass_balance[,10],Melt.Mass_balance[,4],Melt.Mass_balance
[,9],Melt.Mass_balance[,11]))
names(Ice_melt)<-c("ice_melt")
Melt.Mass_balance[,12]<-Ice_melt

#columna de bs_cm w e
Melt.Mass_balance[,13]<-Melt.Mass_balance[,4]-Melt.Mass_balance[,9]+Melt.Mass_balance[,11]
# columna de bs_cum
bs_Cum<-function(MMbal13){
  L<-length(Temperatura[,1])
  bscum<-vector('numeric',L)
  bscum[1]<-MMbal13[1]*10 #valor inicial de la lista
  for (i in 2:L) { bscum[i]<-(MMbal13[i]*10)+bscum[i-1]}
  bscum
}
bs_cum<-as.data.frame(bs_Cum(Melt.Mass_balance[,13]))
names(bs_cum)<-c("bs_cum")
Melt.Mass_balance[,14]<-round(bs_cum,digits = 0)
# Para hallar la sumas totales de las columnas
Totsumas = apply (Melt.Mass_balance[ , 4:13], 2, sum) #Totsumas sirve para sacar el total de la
suma
(sumprom <- mean(Melt.Mass_balance[,8])) #se pone doble parentesis para mostrar los
resultados en la consola
# anadimos la columna de fechas del data frame de datos a Melt.Mass_balance
datostot<-datos[,7]
fechastot<-as.Date.character(datostot,"%d/%m/%Y") # con esto ordenamos si tenemos fechas
Melt.Mass_balance[,15]<-fechastot
#-----
#para la tabla final se tiene
# Datos mensuales (Monthly data)
# Para la columna 1 de la tabla Monthly_data
# Para asignar nombres a las filas de una matriz, vamos a utilizar la función
# "rownames" pero en nuestro caso usaremos una columna donde se le asignara
#valores numéricos los cuales después se cambiara por valores literales
# para que sea un valor literal se hace lo siguiente Monthly_data[,1] <- c("SEP-04", "OCT-04",
"NOV-04", "DEC-04", "JAN-05", "FEB-05", "MAR-05", "APR-05", "MAY-05", "JUN-05", "JUL-05",
"AUG-05")

```

```

#install.packages("lubridate") no usar este paquete
#library(lubridate)
Monthly_data<-vector('numeric',12)
Monthly_data<-as.data.frame(Monthly_data)
Monthly_data[,1]<-1
#-----
#####3 2021 #####
#g<-c('01/09/2004', '01/10/2004', '01/11/2004', '01/12/2004', '01/01/2005', '01/02/2005',
'01/03/2005', '01/04/2005', '01/05/2005', '01/06/2005', '01/07/2005', '01/08/2005')
g<-c('01/09/2005', '01/10/2005', '01/11/2005', '01/12/2005', '01/01/2006', '01/02/2006',
'01/03/2006', '01/04/2006', '01/05/2006', '01/06/2006', '01/07/2006', '01/08/2006')
#####3 2021 #####

h<-as.Date.character(g,"%d/%m/%Y")
Monthly_data[,1] <- h
names(Monthly_data)<-c("datos")
# Para la columna 2 de la tabla Monthly_data
#modelado.- resultados por el modelo
# Se suma de cada columna unos datos escogidos y se le lleva a una celda nueva
# Monthly_data[,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[1:30,13]))*10,digits = 0)
# round(dataframe,digits = 0) con este vamos a calcular que sea un valor entero
# (sum(Melt.Mass_balance[1:30,13]))con este operación calcularemos la suma parcial de una
columna seleccionando los valores
# Donde nos dice que de la filas 1 a 30 se van a sumar de la columna 13
Monthly_data[,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[1:30,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,2,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[31:61,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,3,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[62:91,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,4,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[92:122,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,5,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[123:153,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,6,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[154:181,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,7,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[182:212,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,8,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[213:242,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,9,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[243:273,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,10,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[274:303,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,11,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[304:334,13]))*10,digits = 0)
Monthly_data[,12,2]<-round((sum(Melt.Mass_balance[335:365,13]))*10,digits = 0)
#-----
# 3 third form with the input of data from D disc.
# buscamos del disco y seleccionamos manualmente #####cambiar carpeta y estacas#####
##### 2021 #####
#stakes<-read.csv("E://PROGRAMACION R/ETI_45/stakes_4_5.csv", sep="," , header=TRUE, skip=0)
stakes<-read.csv("E://PROGRAMACION R/ETI_56/stakes_5_6.csv", sep="," , header=TRUE, skip=0)
##### 2021 #####
#stakes<-read.csv("E://PROGRAMACION R/SETI_56/stakes_5_6.csv", sep="," , header=TRUE,
skip=0)
# 1H, 1K,6k, 1N, 7N,8N,9N, 10N,11N,
# 12N,13N,14N,16N,2G,2E,X1,X2

```

```
#####
#bs_o <- stakes[,1] #cambiamos el número de la columna para elegir que estaca usar ejemplo
2G=colum 7
bs_o <- stakes[,scFR] #FR modificación %%%%%%%%%%%%%%%%% 2021 %%%%%%%%%%%%%
bs_o<-data.frame(bs_o)
names(bs_o[,1])<-c("bs_o")
names(Monthly_data[,2])<-c("bs_m")
Monthly_data[,3] <- bs_o[,1]
#-----
# Datos acumulativos
#modelado.-resultados en el modelo
# columna de bs_m del modelo
bs_M<-function(Mondata1,Mondata2){
  M<-length(Mondata1)
  bsm<-vector('numeric',M)
  bsm[1]<-Mondata2[1] #valor inicial de la lista
  for (i in 2:M) { bsm[i]<-(Mondata2[i])+bsm[i-1]}
  bsm
}
bs_m<-as.data.frame(bs_M(Monthly_data[,1],Monthly_data[,2]))
names(bs_m)<-c("bs_m")
Monthly_data[,4]<-round(bs_m,digits = 0)

# para la columna 5 de la tabla Monthly_data
#Observado (2G)- columna.- valores observados acumulados
# b_so (mm.w.e) insertamos una columna con datos en la tabla
bs_Oacum<-function(Mondata1,Monldata3){
  M<-length(Mondata1)
  bsoacum<-vector('numeric',M)
  bsoacum[1]<-Monldata3[1] #valor inicial de la lista
  for (i in 2:M) { bsoacum[i]<-(Monldata3[i])+bsoacum[i-1]}
  bsoacum
}
bs_oacum<-as.data.frame(bs_Oacum(Monthly_data[,1],Monthly_data[,3]))
names(bs_oacum)<-c("bs_oacum")
Monthly_data[,5]<-round(bs_oacum,digits = 0)
# cálculo del error en (mm d-1)
M<-length(Monthly_data[,1])
error<-vector('numeric',M)
for (i in 1:M) {error[i]<-(Monthly_data[i,4]-Monthly_data[i,5])
} #Primero restamos las dos filas y luego procedemos a dividir
error<-as.data.frame(error)
# Operación auxiliar para poder dividir con la anterior columna
# datos
aux_error=c(30,61,91,122,153,181,212,242,273,303,334,365) # colocar fechas manualmente
para años que no sean 2004 a 2006
# Acá se debe sumar el número de días de acuerdo a los meses y años.
#Error [mm d-1]
```

```

aux_error<-data.frame(aux_error) # con estas operaciones extras calculamos el error
Monthly_data[,6]<-(error[,1]/aux_error[,1]) # add los valores de bs_o a la col 3 de Monthly_data
Monthly_data[,6]<-round(Monthly_data[,6],digits = 1) #colocamos el error en valor absoluto
#(Error)2
Monthly_data[,7]<-(Monthly_data[,6])^2 # Error^2 vamos a elevar al cuadrado el error
# abs(error)
Monthly_data[,8]<-abs(Monthly_data[,6]) #calc el absoluto del error
# to save in txt
# 6k, 9k, 10k, 11k, 12k, 4f, 2G, x1
#save valores finales para comparar con seti
#write.table(Monthly_data, file = paste0(save_path,"/monthlydata7N_45.txt"), sep = "\t",
row.names = F) # cambiar nombre
# Errores
# MAE [mm d-1]
# Para hallar la sumas totales de las columnas
sumatotal <- apply (Monthly_data[, 6:8], 2, sum)
# La estructura es el data frame, 1=si es la filas o 2=son las columnas, se pone la función
sumamae <- sumatotal/12 # MAE [mm d-1]
# MAE [mm d-1]
MAE<-colSums(Monthly_data[8])/12
MAE
# bias = sesgo - Bias [mm d-1]
bias<-colSums(Monthly_data[6])/12
bias
# Error final RMS [mm d-1]
sumapromediorms<-colSums(Monthly_data[7])/12
sumapromediorms
rms<-((sumapromediorms)^(1/2))
rms
#-----
#library(ggplot2)
# #Gráficos
# # Grafico de modelo diario
# gr1<-ggplot(data = Melt.Mass_balance,
# aes(x=Melt.Mass_balance[,15],y=Melt.Mass_balance[,14]))+
# geom_point(data = Melt.Mass_balance,
# aes(x=(Melt.Mass_balance[,15]), y=Melt.Mass_balance[,14]),
# colour = 'blue', size = 0.2)
# gr1 + xlab("Modelled (dayli)") + ylab ("bs (mm w.e)") + ggtitle("grafica Cumulated")+
# theme(axis.text.x = element_text(angle = 60, hjust = 1))+
# # etiquetas de los ejes
# scale_x_date(date_breaks = "1 month", date_labels = "%b %Y")
#
# # Save grafica como .png
# ggsave(("E:\\PROGRAMACION
R\\SETI_45\\SETI_12K_45\\IMAGEN_12KSA\\graf_acumulada16.png"), device = png,
# height = 1000, width = 2000,
# units = "cm", limitsize = F)

```

```

# # Grafica para el modelado
# gr3<-ggplot(data = Montlhy_data,
#   aes(x=Montlhy_data[,1],y=Montlhy_data[,4]))+
#   geom_line(data = Montlhy_data, aes(x=(Montlhy_data[,1]), y=Montlhy_data[,4]),
#     colour = 'red', size = 0.02)
#
#   gr3 + xlab("Modelled") + ylab ("bs (mm w.e)")+ ggtitle("grafica Cumulated")+
#     # Etiquetas de los ejes
#     theme(axis.text.x = element_text(angle = 60, hjust = 1)) +
#     scale_x_date(date_breaks = "1 month", date_labels = "%b %Y")
#
# # Save grafica como .png
# ggsave(("E:\\PROGRAMACION
R\\SETI_45\\SETI_12K_45\\IMAGEN_12KSA\\graf_modelada16.png"), device = png,
#   height = 1000, width = 2000,
#   units = "cm", limitsize = F)
# #-----
#
# # Grafica observer (2G) para el punto en obserbacion
# gr2<-ggplot(data = Montlhy_data,
#   aes(x=Montlhy_data[,1],y=Montlhy_data[,5]))+
#   geom_line(data = Montlhy_data, aes(x=(Montlhy_data[,1]), y=Montlhy_data[,5]), colour =
'blue', size = 1.5)
#   gr2 + xlab("OBSERVER") + ylab ("bs (mm w.e)")+ ggtitle("grafica Cumulated")+
#     # etiquetas de los ejes
#     theme_bw()+ #este tema sirve para cambiar de color el fondo de la imagen
#     theme(legend.position = "left")+
#
#     theme(axis.text.x = element_text(angle = 60, hjust = 1))+
#     scale_x_date(date_breaks = "1 month", date_labels = "%b %Y")
#
# # Save grafica como .png
# ggsave(("E:\\PROGRAMACION
R\\SETI_45\\SETI_12K_45\\IMAGEN_12KSA\\graf_observada16.png"), device = png,
#   height = 1000, width = 2000,
#   units = "cm", limitsize = F)
# #-----
# #grafica para el albedo
# gr4<-ggplot(data = Melt.Mass_balance,
#   aes(x=Melt.Mass_balance[,15],y=Melt.Mass_balance[,8],ymin=0,
ymax=0.90),width=0.1)+
#   geom_line(data = Melt.Mass_balance,
#     aes(x=(Melt.Mass_balance[,15]), y=Melt.Mass_balance[,8]),
#     colour = 'blue', size = 0.2)
#   gr4 + xlab(" ") + ylab ("Albedo")+ ggtitle("grafica del albedo")+
#     # etiquetas de los ejes
#     theme(axis.text.x = element_text(angle = 60, hjust = 1))+
#     #para rotar las etiquetas

```

```

# scale_x_date(date_breaks = "1 month", date_labels = "%b %Y")
# #para espacio entre los labels de x
#
# # Save grafica como .png
# ggsave("E:\\PROGRAMACION
R\\SETI_45\\SETI_12K_45\\IMAGEN_12KSA\\graf_albedo16.png"), device = png,
# height = 1000, width = 2000,
# units = "cm", limitsize = F)
# #-----
# grafico multiple
gr7<-ggplot(data = Montlhy_data,
aes(x=Montlhy_data[,1]))+
geom_line(data = Montlhy_data, aes(x=(Montlhy_data[,1]), y=Montlhy_data[,4]), colour =
'blue', size = 1)+
geom_point(data = Montlhy_data, aes(x=(Montlhy_data[,1]), y=Montlhy_data[,5]), colour =
'red', size = 1)
gr7 + xlab("OBSERVER") + ylab ("bs (mm w.e)") + ggtitle("grafica Cumulated")+
# etiquetas de los ejes
theme(axis.text.x = element_text(angle = 60, hjust = 1))+
# sirve para rotar los labes con un angulo
scale_x_date(date_breaks = "1 month", date_labels = "%b %Y")
#para espacio entre los labels de x

# Save grafica .png
# ggsave("E:\\PROGRAMACION R\\SETI_56\\SETI_1H_56\\IMAGEN_1HC\\graf_multiple1.png"),
device = png,
# width = 2000, height = 1000,
# units = "cm", limitsize = F)

#####FR-----fin programación
previa
ggsave(paste(dirpath, "IMAGEN_", ids, idst, "/", "graf_multiple", jFR, ".png", sep=""), device = png,
width = 2000, height = 1000,
units = "cm", limitsize = F) #FR modificacion

yFR1[iFR1,iFR2,iFR3,iFR4]=MAE #FR
yFR2[iFR1,iFR2,iFR3,iFR4]=bias #FR
yFR3[iFR1,iFR2,iFR3,iFR4]=rms #FR

MFR[jFR,5]=MAE #col5=mae
MFR[jFR,6]=bias #col6=bias
MFR[jFR,7]=rms #col7=rms
MFR[jFR,8]=paste(iFR1,iFR2,iFR3,iFR4,sep="-")#col8=indice (combinacion)

jFR=jFR+1

}
}

```



```
}  
}  
##### 2021 #####  
#FR-----exportar datos a Excel  
  
#write.xlsx(MFR, paste(dirpath,"varFR0405",ids,idst,".xlsx",sep="")) #ETI 2004-2005  
write.xlsx(MFR, paste(dirpath,"varFR0506",ids,idst,".xlsx",sep="")) #ETI 2005-2006  
  
#FR -----Pruebas  
##### 2021 #####  
  
# xFR1  
# xFR2  
# xFR3  
# xFR4  
#  
# yFR1[1,1,,]  
##  
  min(yFR1)  
#which.min(yFR1)  
  which(yFR1==min(yFR1),arr.ind = TRUE)  
# yFR1[which(yFR1==min(yFR1),arr.ind = TRUE)]  
# yFR2[which(yFR1==min(yFR1),arr.ind = TRUE)]  
# yFR3[which(yFR1==min(yFR1),arr.ind = TRUE)]  
# #  
# yFR1[5,1,1,2]  
#  
#  
# write.xlsx(MFR, "E://PROGRAMACION R/SETI_56/SETI_1H_56/varFR05061HC.xlsx")  
# iFR1  
#  
# MFR[1,2]=5  
#  
# paste(dirpath,"5",sep="")
```

### A.3. Alternativas de los valores autocalibrados de TF y SRF con sus respectivos errores

Se presentan cinco alternativas de combinaciones posibles de los valores de TF y SRF con sus respectivos errores, esta combinación de alternativas se puede ver en la columna 9.

Tabla A.3: Combinación de valores autocalibrados de TF y SRF con sus respectivos errores para la estaca 2G para el parámetro topográfico Combinado, para el periodo 2004 a 2005.

Nro	TF wet ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ )	SRF wet ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ )	TF dry ( $mm\ dia^{-1}\ (^{\circ}C)^{-1}$ )	SRF dry ( $mm\ dia^{-1}\ m^2\ W^{-1}$ )	MAE ( $mm\ dia^{-1}$ )	bias ( $mm\ dia^{-1}$ )	RMS ( $mm\ dia^{-1}$ )	Alternativa
1	0.002	9e-04	0.002	9e-04	11.275	11.275	11.7144853351168	1-1-1-1
2	0.049	9e-04	0.002	9e-04	11.0666666666667	11.0666666666667	11.4956513517069	2-1-1-1
3	0.096	9e-04	0.002	9e-04	10.9	10.9	11.3177589065445	3-1-1-1
4	0.143	9e-04	0.002	9e-04	10.6916666666667	10.6916666666667	11.1034904421988	4-1-1-1
5	0.19	9e-04	0.002	9e-04	10.5166666666667	10.5166666666667	10.915661531335	5-1-1-1
6	0.002	0.007025	0.002	9e-04	8.283333333333333	8.283333333333333	8.64677203739446	1-2-1-1
7	0.049	0.007025	0.002	9e-04	8.091666666666667	8.091666666666667	8.45098613575165	2-2-1-1
8	0.096	0.007025	0.002	9e-04	7.9	7.9	8.25207044726756	3-2-1-1
9	0.143	0.007025	0.002	9e-04	7.716666666666667	7.716666666666667	8.05719140478451	4-2-1-1
10	0.19	0.007025	0.002	0.0009	7.491666666666667	7.491666666666667	7.82980416953919	5-2-1-1
11	0.002	0.01315	0.002	9e-04	5.308333333333333	5.308333333333333	5.66693626809643	1-3-1-1
12	0.049	0.01315	0.002	9e-04	5.1	5.1	5.45114666836254	2-3-1-1
13	0.096	0.01315	0.002	9e-04	4.908333333333333	4.908333333333333	5.26584909265986	3-3-1-1
14	0.143	0.01315	0.002	9e-04	4.708333333333333	4.708333333333333	5.06746156045279	4-3-1-1
15	0.19	0.01315	0.002	9e-04	4.516666666666667	4.516666666666667	4.88245156999364	5-3-1-1
16	0.002	0.019275	0.002	9e-04	2.466666666666667	2.466666666666667	2.90946730519523	1-4-1-1
17	0.049	0.019275	0.002	9e-04	2.291666666666667	2.108333333333333	2.7744368798102	2-4-1-1
18	0.096	0.019275	0.002	9e-04	2.1	1.916666666666667	2.62583320110018	3-4-1-1
19	0.143	0.019275	0.002	9e-04	1.975	1.708333333333333	2.48612818119528	4-4-1-1
20	0.19	0.019275	0.002	9e-04	1.908333333333333	1.541666666666667	2.37539470404394	5-4-1-1
21	0.002	0.0254	0.002	9e-04	1.916666666666667	-0.683333333333333	2.17447311625905	1-5-1-1
22	0.049	0.0254	0.002	9e-04	1.958333333333333	-0.891666666666667	2.2618208004467	2-5-1-1
23	0.096	0.0254	0.002	9e-04	2	-1.066666666666667	2.3618495577266	3-5-1-1
24	0.143	0.0254	0.002	9e-04	2.05	-1.266666666666667	2.48394846967484	4-5-1-1
25	0.19	0.0254	0.002	9e-04	2.133333333333333	-1.483333333333333	2.63375524046307	5-5-1-1
26	0.002	9e-04	0.049	9e-04	11.191666666666667	11.191666666666667	11.6353985750382	1-1-2-1
27	0.049	9e-04	0.049	9e-04	11	11	11.4329203035212	2-1-2-1
28	0.096	9e-04	0.049	9e-04	10.808333333333333	10.808333333333333	11.2305758237649	3-1-2-1
29	0.143	9e-04	0.049	9e-04	10.608333333333333	10.608333333333333	11.0242535650568	4-1-2-1
30	0.19	9e-04	0.049	9e-04	10.433333333333333	10.433333333333333	10.83628165000864	5-1-2-1
31	0.002	0.007025	0.049	9e-04	8.2	8.2	8.56543441202293	1-2-2-1
32	0.049	0.007025	0.049	9e-04	8	8	8.36112033960362	2-2-2-1
33	0.096	0.007025	0.049	9e-04	7.816666666666667	7.816666666666667	8.16965931562225	3-2-2-1
34	0.143	0.007025	0.049	9e-04	7.633333333333333	7.633333333333333	7.97443832922838	4-2-2-1
35	0.19	0.007025	0.049	9e-04	7.416666666666667	7.416666666666667	7.75521330031182	5-2-2-1
36	0.002	0.01315	0.049	9e-04	5.225	5.225	5.5803972379512	1-3-2-1
37	0.049	0.01315	0.049	9e-04	5.025	5.025	5.37408907009675	2-3-2-1
38	0.096	0.01315	0.049	9e-04	4.825	4.825	5.17679115540377	3-3-2-1
39	0.143	0.01315	0.049	9e-04	4.625	4.625	4.97803508759564	4-3-2-1
40	0.19	0.01315	0.049	9e-04	4.433333333333333	4.433333333333333	4.7927027865287	5-3-2-1
41	0.002	0.019275	0.049	9e-04	2.383333333333333	2.383333333333333	2.81602556806574	1-4-2-1
42	0.049	0.019275	0.049	9e-04	2.2	2.016666666666667	2.67114207783862	2-4-2-1
43	0.096	0.019275	0.049	9e-04	2.016666666666667	1.833333333333333	2.53278502838279	3-4-2-1

44	0.143	0.019275	0.049	9e-04	1.9	1.6333333333333333	2.39930545505708	4-4-2-1
45	0.19	0.019275	0.049	9e-04	1.85	1.466666666666667	2.28946842866	5-4-2-1
46	0.002	0.0254	0.049	9e-04	1.875	-0.775	2.14728510760293	1-5-2-1
47	0.049	0.0254	0.049	9e-04	1.9333333333333333	-0.966666666666667	2.25721066805914	2-5-2-1
48	0.096	0.0254	0.049	9e-04	1.9583333333333333	-1.1583333333333333	2.35141801189552	3-5-2-1
49	0.143	0.0254	0.049	9e-04	2.0333333333333333	-1.3333333333333333	2.47924719757161	4-5-2-1
50	0.19	0.0254	0.049	9e-04	2.116666666666667	-1.566666666666667	2.63122278291545	5-5-2-1
51	0.002	9e-04	0.096	9e-04	11.116666666666667	11.116666666666667	11.5653937820263	1-1-3-1
52	0.049	9e-04	0.096	9e-04	10.916666666666667	10.916666666666667	11.3536337795439	1-1-3-1
53	0.096	9e-04	0.096	9e-04	10.725	10.725	11.1521672034333	3-1-3-1
54	0.143	9e-04	0.096	9e-04	10.533333333333333	10.533333333333333	10.9527013410695	4-1-3-1
55	0.19	9e-04	0.096	9e-04	10.35	10.35	10.7577104131564	5-1-3-1
56	0.002	0.007025	0.096	9e-04	8.125	8.125	8.49161350981072	1-2-3-1
57	0.049	0.007025	0.096	9e-04	7.908333333333333	7.908333333333333	8.27189015078577	2-2-3-1
58	0.096	0.007025	0.096	9e-04	7.741666666666667	7.741666666666667	8.09603812573368	3-2-3-1
59	0.143	0.007025	0.096	9e-04	7.558333333333333	7.558333333333333	7.90216215137773	4-2-3-1
60	0.19	0.007025	0.096	9e-04	7.333333333333333	7.333333333333333	7.67267880208731	5-2-3-1
61	0.002	0.01315	0.096	9e-04	5.141666666666667	5.141666666666667	5.49386020936099	1-3-3-1
62	0.049	0.01315	0.096	9e-04	4.941666666666667	4.941666666666667	5.28827319011918	2-3-3-1
63	0.096	0.01315	0.096	9e-04	4.733333333333333	4.733333333333333	5.081666393353	3-3-3-1
64	0.143	0.01315	0.096	9e-04	4.541666666666667	4.541666666666667	4.89089289734843	4-3-3-1
65	0.19	0.01315	0.096	9e-04	4.358333333333333	4.358333333333333	4.71725555805492	5-3-3-1
66	0.002	0.019275	0.096	9e-04	2.15	2.15	2.74560254467637	1-4-3-1
67	0.049	0.019275	0.096	9e-04	1.933333333333333	1.933333333333333	2.57584937447825	2-4-3-1
68	0.096	0.019275	0.096	9e-04	1.758333333333333	1.758333333333333	2.44659627510003	3-4-3-1
69	0.143	0.019275	0.096	9e-04	1.583333333333333	1.583333333333333	2.32683619248684	4-4-3-1
70	0.19	0.019275	0.096	9e-04	1.375	1.375	2.19222109590555	5-4-3-1
71	0.002	0.0254	0.096	9e-04	1.825	-0.858333333333333	2.12308737455621	1-5-3-1
72	0.049	0.0254	0.096	9e-04	1.891666666666667	-1.058333333333333	2.25185109039948	2-5-3-1
73	0.096	0.0254	0.096	9e-04	1.933333333333333	-1.233333333333333	2.34449710314742	3-5-3-1
74	0.143	0.0254	0.096	9e-04	2.025	-1.425	2.48176684373586	4-5-3-1
75	0.19	0.0254	0.096	9e-04	2.116666666666667	-1.65	2.64764045897475	5-5-3-1
76	0.002	9e-04	0.143	9e-04	11.033333333333333	11.033333333333333	11.4877470956377	1-1-4-1
77	0.049	9e-04	0.143	9e-04	10.833333333333333	10.833333333333333	11.276006976467	2-1-4-1
78	0.096	9e-04	0.143	9e-04	10.65	10.65	11.0822681192374	3-1-4-1
79	0.143	9e-04	0.143	9e-04	10.45	10.45	10.8748946355049	4-1-4-1
80	0.19	9e-04	0.143	9e-04	10.266666666666667	10.266666666666667	10.6798876398584	5-1-4-1
81	0.002	0.007025	0.143	9e-04	8.033333333333333	8.033333333333333	8.40337233892838	1-2-4-1
82	0.049	0.007025	0.143	9e-04	7.85	7.85	8.21664976333623	2-2-4-1
83	0.096	0.007025	0.143	9e-04	7.666666666666667	7.666666666666667	8.02371485036701	3-2-4-1
84	0.143	0.007025	0.143	9e-04	7.475	7.475	7.8212850606534	4-2-4-1
85	0.19	0.007025	0.143	9e-04	5.075	5.075	7.59961621838015	5-2-4-1
86	0.002	0.01315	0.143	9e-04	4.858333333333333	4.858333333333333	5.42809051754544	1-3-4-1
87	0.049	0.01315	0.143	9e-04	4.658333333333333	4.658333333333333	5.20232319898203	2-3-4-1
88	0.096	0.01315	0.143	9e-04	4.466666666666667	4.466666666666667	5.00607963713456	3-3-4-1
89	0.143	0.01315	0.143	9e-04	4.275	4.275	4.81317635939788	4-3-4-1
90	0.19	0.01315	0.143	9e-04	2.233333333333333	2.066666666666667	4.63024477394734	5-3-4-1
91	0.002	0.019275	0.143	9e-04	2.05	1.866666666666667	2.65581123827228	1-4-4-1
92	0.049	0.019275	0.143	9e-04	2.05	1.866666666666667	2.51064400768674	2-4-4-1

93	0.096	0.019275	0.143	9e-04	1.858333333333333	1.675	2.35884858917792	3-4-4-1
94	0.143	0.019275	0.143	9e-04	1.783333333333333	1.483333333333333	2.24462320520245	4-4-4-1
95	0.19	0.019275	0.143	9e-04	1.708333333333333	1.291666666666667	2.10218140669797	5-4-4-1
96	0.002	0.0254	0.143	9e-04	1.791666666666667	-0.941666666666667	2.11364613878483	1-5-4-1
97	0.049	0.0254	0.143	9e-04	1.858333333333333	-1.141666666666667	2.23550889061082	2-5-4-1
98	0.096	0.0254	0.143	9e-04	1.941666666666667	-1.308333333333333	2.35672795771312	3-5-4-1
99	0.143	0.0254	0.143	9e-04	2	-1.5	2.48294180358703	4-5-4-1
100	0.19	0.0254	0.143	9e-04	2.1	-1.716666666666667	2.6542418879974	5-5-4-1
101	0.002	9e-04	0.19	9e-04	10.958333333333333	10.958333333333333	11.4179318033813	1-1-5-1
102	0.049	9e-04	0.19	9e-04	10.75	10.75	11.1988838729581	2-1-5-1
103	0.096	9e-04	0.19	9e-04	10.566666666666667	10.566666666666667	11.0043930621669	3-1-5-1
104	0.143	9e-04	0.19	9e-04	10.366666666666667	10.366666666666667	10.7978392900308	4-1-5-1
105	0.19	9e-04	0.19	9e-04	10.2	10.2	10.6175954591109	5-1-5-1
106	0.002	0.007025	0.19	9e-04	7.966666666666667	7.966666666666667	8.34016386729501	1-2-5-1
107	0.049	0.007025	0.19	9e-04	7.766666666666667	7.766666666666667	8.13654308249722	2-2-5-1
108	0.096	0.007025	0.19	9e-04	7.575	7.575	7.93636146690241	3-2-5-1
109	0.143	0.007025	0.19	9e-04	7.391666666666667	7.391666666666667	7.74107012412797	4-2-5-1
110	0.19	0.007025	0.19	9e-04	7.175	7.175	7.52047205965158	5-2-5-1
111	0.002	0.01315	0.19	9e-04	4.991666666666667	4.991666666666667	5.34392178086469	1-3-5-1
112	0.049	0.01315	0.19	9e-04	4.766666666666667	4.766666666666667	5.11060987880442	2-3-5-1
113	0.096	0.01315	0.19	9e-04	4.575	4.575	4.92197453603057	3-3-5-1
114	0.143	0.01315	0.19	9e-04	4.391666666666667	4.391666666666667	4.73998945146506	4-3-5-1
115	0.19	0.01315	0.19	9e-04	4.2	4.2	4.55430199554956	5-3-5-1
116	0.002	0.019275	0.19	9e-04	2.15	1.983333333333333	2.5648261799454	1-4-5-1
117	0.049	0.019275	0.19	9e-04	1.966666666666667	1.783333333333333	2.41971072651257	2-4-5-1
118	0.096	0.019275	0.19	9e-04	1.775	1.575	2.26439837484485	3-4-5-1
119	0.143	0.019275	0.19	9e-04	1.708333333333333	1.391666666666667	2.15232432500309	4-4-5-1
120	0.19	0.019275	0.19	9e-04	1.641666666666667	1.208333333333333	2.02834086550231	5-4-5-1
121	0.002	0.0254	0.19	9e-04	1.766666666666667	-1.016666666666667	2.11226576610678	1-5-5-1
122	0.049	0.0254	0.19	9e-04	1.858333333333333	-1.225	2.24592223076995	2-5-5-1
123	0.096	0.0254	0.19	9e-04	1.925	-1.391666666666667	2.36414184571626	3-5-5-1
124	0.143	0.0254	0.19	9e-04	2	-1.583333333333333	2.50466231922256	4-5-5-1
125	0.19	0.0254	0.19	9e-04	2.133333333333333	-1.8	2.67394839142419	5-5-5-1
126	0.002	9e-04	0.002	0.007025	10.191666666666667	10.191666666666667	10.7492247782495	1-1-1-2
127	0.049	9e-04	0.002	0.007025	9.983333333333333	9.983333333333333	10.5311442873033	2-1-1-2
128	0.096	9e-04	0.002	0.007025	9.808333333333333	9.808333333333333	10.343719002523	3-1-1-2
129	0.143	9e-04	0.002	0.007025	9.608333333333333	9.608333333333333	10.1364441497006	4-1-1-2
130	0.19	9e-04	0.002	0.007025	9.416666666666667	9.416666666666667	9.93352908084534	5-1-1-2
131	0.002	0.007025	0.002	0.007025	7.191666666666667	7.191666666666667	7.65304950112481	1-2-1-2
132	0.049	0.007025	0.002	0.007025	7	7	7.45665251078972	2-2-1-2
133	0.096	0.007025	0.002	0.007025	6.825	6.825	7.27283759386023	3-2-1-2
134	0.143	0.007025	0.002	0.007025	6.4	6.4	7.06882828574392	4-2-1-2
135	0.19	0.007025	0.002	0.007025	6.4	6.4	6.83166646336505	5-2-1-2
136	0.002	0.01315	0.002	0.007025	4.208333333333333	4.208333333333333	4.63582067527782	1-3-1-2
137	0.049	0.01315	0.002	0.007025	4.016666666666667	4.016666666666667	4.42944691807002	2-3-1-2
138	0.096	0.01315	0.002	0.007025	3.825	3.825	4.23861219426044	3-3-1-2
139	0.143	0.01315	0.002	0.007025	3.625	3.625	4.04052389342438	4-3-1-2
140	0.19	0.01315	0.002	0.007025	3.425	3.425	3.85151485349163	5-3-1-2
141	0.002	0.019275	0.002	0.007025	1.441666666666667	1.208333333333333	1.89362967164473	1-4-1-2

142	0.049	0.019275	0.002	0.007025	1.3	1.01666666666667	1.76870951072621	2-4-1-2
143	0.096	0.019275	0.002	0.007025	1.125	0.816666666666667	1.6532795690183	3-4-1-2
144	0.143	0.019275	0.002	0.007025	1.125	0.625	1.56391602502607	4-4-1-2
145	0.19	0.019275	0.002	0.007025	1.108333333333333	0.458333333333333	1.48856754409511	5-4-1-2
146	0.002	0.0254	0.002	0.007025	2.041666666666667	-1.775	2.3225345350859	1-5-1-2
147	0.049	0.0254	0.002	0.007025	2.191666666666667	-1.991666666666667	2.50748878362397	2-5-1-2
148	0.096	0.0254	0.002	0.007025	2.308333333333333	-2.158333333333333	2.6556543449779	3-5-1-2
149	0.143	0.0254	0.002	0.007025	2.441666666666667	-2.341666666666667	2.82533183891733	4-5-1-2
150	0.19	0.0254	0.002	0.007025	2.6	-2.566666666666667	3.0246211884025	5-5-1-2
151	0.002	9e-04	0.049	0.007025	10.108333333333333	10.108333333333333	10.680862948907	1-1-2-2
152	0.049	9e-04	0.049	0.007025	9.908333333333333	9.908333333333333	10.4695988461832	2-1-2-2
153	0.096	9e-04	0.049	0.007025	9.725	9.725	10.2750912404708	3-1-2-2
154	0.143	9e-04	0.049	0.007025	9.525	9.525	10.0685566658451	4-1-2-2
155	0.19	9e-04	0.049	0.007025	9.341666666666667	9.341666666666667	9.87256299042959	5-1-2-2
156	0.002	0.007025	0.049	0.007025	7.108333333333333	7.108333333333333	7.58567729342608	1-2-2-2
157	0.049	0.007025	0.049	0.007025	6.908333333333333	6.908333333333333	7.38235508944582	2-2-2-2
158	0.096	0.007025	0.049	0.007025	6.733333333333333	6.733333333333333	7.19872673926901	3-2-2-2
159	0.143	0.007025	0.049	0.007025	6.533333333333333	6.533333333333333	6.98796584612909	4-2-2-2
160	0.19	0.007025	0.049	0.007025	6.325	6.325	6.7715704726944	5-2-2-2
161	0.002	0.01315	0.049	0.007025	4.125	4.125	4.57119605063416	1-3-2-2
162	0.049	0.01315	0.049	0.007025	3.941666666666667	3.941666666666667	4.37197514479059	2-3-2-2
163	0.096	0.01315	0.049	0.007025	3.733333333333333	3.733333333333333	4.16793314085851	3-3-2-2
164	0.143	0.01315	0.049	0.007025	3.541666666666667	3.541666666666667	3.97607427831356	4-3-2-2
165	0.19	0.01315	0.049	0.007025	3.35	3.35	3.79451358323216	5-3-2-2
166	0.002	0.019275	0.049	0.007025	1.391666666666667	1.141666666666667	1.86614576065215	1-4-2-2
167	0.049	0.019275	0.049	0.007025	1.241666666666667	0.925	1.72699160391705	2-4-2-2
168	0.096	0.019275	0.049	0.007025	1.141666666666667	0.741666666666667	1.62403817689117	3-4-2-2
169	0.143	0.019275	0.049	0.007025	1.1	0.55	1.54326493728934	4-4-2-2
170	0.19	0.019275	0.049	0.007025	1.083333333333333	0.366666666666667	1.4804278668016	5-4-2-2
171	0.002	0.0254	0.049	0.007025	2.091666666666667	-1.858333333333333	2.37574549703176	1-5-2-2
172	0.049	0.0254	0.049	0.007025	2.25	-2.066666666666667	2.56904651573303	2-5-2-2
173	0.096	0.0254	0.049	0.007025	2.358333333333333	-2.241666666666667	2.71860871280391	3-5-2-2
174	0.143	0.0254	0.049	0.007025	2.516666666666667	-2.433333333333333	2.90287214094363	4-5-2-2
175	0.19	0.0254	0.049	0.007025	2.691666666666667	-2.658333333333333	3.09529212407058	5-5-2-2
176	0.002	9e-04	0.096	0.007025	10.025	10.025	10.613709687632	1-1-3-2
177	0.049	9e-04	0.096	0.007025	9.833333333333333	9.833333333333333	10.408249329458	2-1-3-2
178	0.096	9e-04	0.096	0.007025	9.65	9.65	10.2146952964834	3-1-3-2
179	0.143	9e-04	0.096	0.007025	9.441666666666667	9.441666666666667	10.0002083311632	4-1-3-2
180	0.19	9e-04	0.096	0.007025	9.25	9.25	9.79863936132631	5-1-3-2
181	0.002	0.007025	0.096	0.007025	7.033333333333333	7.033333333333333	7.5250692134137	1-2-3-2
182	0.049	0.007025	0.096	0.007025	6.833333333333333	6.833333333333333	7.3229092579384	2-2-3-2
183	0.096	0.007025	0.096	0.007025	6.666666666666667	6.666666666666667	7.14527816113551	3-2-3-2
184	0.143	0.007025	0.096	0.007025	6.475	6.475	6.94316210382561	4-2-3-2
185	0.19	0.007025	0.096	0.007025	6.25	6.25	6.7113088639003	5-2-3-2
186	0.002	0.01315	0.096	0.007025	4.05	4.05	4.51442133611828	1-3-3-2
187	0.049	0.01315	0.096	0.007025	3.858333333333333	3.858333333333333	4.3088080677402	2-3-3-2
188	0.096	0.01315	0.096	0.007025	3.658333333333333	3.658333333333333	4.11369663441533	3-3-3-2
189	0.143	0.01315	0.096	0.007025	3.466666666666667	3.466666666666667	3.92045915678253	4-3-3-2
190	0.19	0.01315	0.096	0.007025	3.266666666666667	3.266666666666667	3.73697738821096	5-3-3-2

191	0.002	0.019275	0.096	0.007025	1.325	1.0583333333333333	1.82597006182102	1-4-3-2
192	0.049	0.019275	0.096	0.007025	1.2	0.85	1.69558249578132	2-4-3-2
193	0.096	0.019275	0.096	0.007025	1.1	0.6666666666666667	1.59895799402819	3-4-3-2
194	0.143	0.019275	0.096	0.007025	1.0583333333333333	0.475	1.53324275094759	4-4-3-2
195	0.19	0.019275	0.096	0.007025	1.05	0.2833333333333333	1.46969384566991	5-4-3-2
196	0.002	0.0254	0.096	0.007025	2.15	-1.95	2.44438131231606	1-5-3-2
197	0.049	0.0254	0.096	0.007025	2.291666666666667	-2.141666666666667	2.6231342575883	2-5-3-2
198	0.096	0.0254	0.096	0.007025	2.441666666666667	-2.325	2.78043761543634	3-5-3-2
199	0.143	0.0254	0.096	0.007025	2.591666666666667	-2.5083333333333333	2.95197673884241	4-5-3-2
200	0.19	0.0254	0.096	0.007025	2.75	-2.716666666666667	3.14483703870328	5-5-3-2
201	0.002	9e-04	0.143	0.007025	9.941666666666667	9.941666666666667	10.5467609561735	1-1-4-2
202	0.049	9e-04	0.143	0.007025	9.75	9.75	10.3412604002929	2-1-4-2
203	0.096	9e-04	0.143	0.007025	9.558333333333333	9.558333333333333	10.141457817625	3-1-4-2
204	0.143	9e-04	0.143	0.007025	9.358333333333333	9.358333333333333	9.9343260130385	4-1-4-2
205	0.19	9e-04	0.143	0.007025	9.175	9.175	9.73939594293883	5-1-4-2
206	0.002	0.007025	0.143	0.007025	6.95	6.95	7.45966934030368	1-2-4-2
207	0.049	0.007025	0.143	0.007025	6.75	6.75	7.25844335928855	2-2-4-2
208	0.096	0.007025	0.143	0.007025	6.575	6.575	7.0740723735097	3-2-4-2
209	0.143	0.007025	0.143	0.007025	6.383333333333333	6.383333333333333	6.87168101704379	4-2-4-2
210	0.19	0.007025	0.143	0.007025	6.166666666666667	6.166666666666667	6.6470544855096	5-2-4-2
211	0.002	0.01315	0.143	0.007025	3.966666666666667	3.966666666666667	4.45570794973519	1-3-4-2
212	0.049	0.01315	0.143	0.007025	3.766666666666667	3.766666666666667	4.2428371011231	2-3-4-2
213	0.096	0.01315	0.143	0.007025	3.575	3.575	4.05452422198544	3-3-4-2
214	0.143	0.01315	0.143	0.007025	3.375	3.375	3.85627194753344	4-3-4-2
215	0.19	0.01315	0.143	0.007025	3.183333333333333	3.183333333333333	3.67922093202714	5-3-4-2
216	0.002	0.019275	0.143	0.007025	1.291666666666667	0.975	1.79606050380641	1-4-4-2
217	0.049	0.019275	0.143	0.007025	1.175	0.775	1.68151717208002	2-4-4-2
218	0.096	0.019275	0.143	0.007025	1.058333333333333	0.575	1.58192920195564	3-4-4-2
219	0.143	0.019275	0.143	0.007025	1.05	0.3833333333333333	1.52643375224737	4-4-4-2
220	0.19	0.019275	0.143	0.007025	1.075	0.191666666666667	1.47450556684831	5-4-4-2
221	0.002	0.0254	0.143	0.007025	2.216666666666667	-2.033333333333333	2.51197133741609	1-5-4-2
222	0.049	0.0254	0.143	0.007025	2.383333333333333	-2.233333333333333	2.69722079185224	2-5-4-2
223	0.096	0.0254	0.143	0.007025	2.516666666666667	-2.4	2.849561369755	3-5-4-2
224	0.143	0.0254	0.143	0.007025	2.683333333333333	-2.6	3.0347981810987	4-5-4-2
225	0.19	0.0254	0.143	0.007025	2.833333333333333	-2.8	3.21532787337984	5-5-4-2
226	0.002	9e-04	0.19	0.007025	9.875	9.875	10.4933709232702	1-1-5-2
227	0.049	9e-04	0.19	0.007025	9.475	9.475	10.2682763889564	2-1-5-2
228	0.096	9e-04	0.19	0.007025	9.275	9.275	10.0764990613473	3-1-5-2
229	0.143	9e-04	0.19	0.007025	9.091666666666667	9.091666666666667	9.86884829484508	4-1-5-2
230	0.19	9e-04	0.19	0.007025	6.875	6.875	9.67440781994778	5-1-5-2
231	0.002	0.007025	0.19	0.007025	6.875	6.875	7.4025333501444	1-2-5-2
232	0.049	0.007025	0.19	0.007025	6.683333333333333	6.683333333333333	7.2069410986909	2-2-5-2
233	0.096	0.007025	0.19	0.007025	6.491666666666667	6.491666666666667	7.01112211656118	3-2-5-2
234	0.143	0.007025	0.19	0.007025	6.3	6.3	6.80771621030137	4-2-5-2
235	0.19	0.007025	0.19	0.007025	6.083333333333333	6.083333333333333	6.58483105326173	5-2-5-2
236	0.002	0.01315	0.19	0.007025	3.891666666666667	3.891666666666667	4.4019881871719	1-3-5-2
237	0.049	0.01315	0.19	0.007025	3.683333333333333	3.683333333333333	4.18509259156832	2-3-5-2
238	0.096	0.01315	0.19	0.007025	3.491666666666667	3.491666666666667	3.99718651053463	3-3-5-2
239	0.143	0.01315	0.19	0.007025	3.308333333333333	3.308333333333333	3.81324446283389	4-3-5-2

240	0.19	0.01315	0.007025	3.108333333333333	3.108333333333333	3.62962348827901	5-3-5-2
241	0.002	0.019275	0.007025	1.241666666666667	0.891666666666667	1.77082843136576	1-4-5-2
242	0.049	0.019275	0.007025	1.133333333333333	0.7	1.664333169770932	2-4-5-2
243	0.096	0.019275	0.007025	1.041666666666667	0.491666666666667	1.57188846084362	3-4-5-2
244	0.143	0.019275	0.007025	1.058333333333333	0.308333333333333	1.52452178294266	4-4-5-2
245	0.19	0.019275	0.007025	1.125	0.125	1.49080515158756	5-4-5-2
246	0.002	0.0254	0.007025	2.283333333333333	-2.1	2.57164020293145	1-5-5-2
247	0.049	0.0254	0.007025	2.466666666666667	-2.316666666666667	2.7646579052992	2-5-5-2
248	0.096	0.0254	0.007025	2.591666666666667	-2.475	2.90989690539029	3-5-5-2
249	0.143	0.0254	0.007025	2.75	-2.666666666666667	3.09596511608254	4-5-5-2
250	0.19	0.0254	0.007025	2.916666666666667	-2.883333333333333	3.28455983859837	5-5-5-2
251	0.002	9e-04	0.01315	9.1	9.1	9.93420018588982	1-1-1-3
252	0.049	9e-04	0.01315	8.883333333333333	8.883333333333333	9.71279225214528	2-1-1-3
253	0.096	9e-04	0.01315	8.725	8.725	9.53943569260432	3-1-1-3
254	0.143	9e-04	0.01315	8.516666666666667	8.516666666666667	9.32854043603107	4-1-1-3
255	0.19	9e-04	0.01315	8.333333333333333	8.333333333333333	9.13774224485093	5-1-1-3
256	0.002	0.007025	0.01315	6.091666666666667	6.091666666666667	6.87695426769729	1-2-1-3
257	0.049	0.007025	0.01315	5.916666666666667	5.916666666666667	6.69676538835479	2-2-1-3
258	0.096	0.007025	0.01315	5.733333333333333	5.733333333333333	6.51195936943628	3-2-1-3
259	0.143	0.007025	0.01315	5.533333333333333	5.533333333333333	6.310441083336863	4-2-1-3
260	0.19	0.007025	0.01315	5.316666666666667	5.316666666666667	6.09193455863297	5-2-1-3
261	0.002	0.01315	0.01315	3.125	3.125	3.99656102167851	1-3-1-3
262	0.049	0.01315	0.01315	2.925	2.925	3.79945171483115	2-3-1-3
263	0.096	0.01315	0.01315	2.725	2.725	3.6206583195141	3-3-1-3
264	0.143	0.01315	0.01315	2.533333333333333	2.533333333333333	3.45060381189534	4-3-1-3
265	0.19	0.01315	0.01315	2.341666666666667	2.341666666666667	3.29330128189532	5-3-1-3
266	0.002	0.019275	0.01315	1.541666666666667	0.125	1.92288845230294	1-4-1-3
267	0.049	0.019275	0.01315	1.533333333333333	-0.083333333333333	1.89780575050943	2-4-1-3
268	0.096	0.019275	0.01315	1.525	-0.275	1.89450961113072	3-4-1-3
269	0.143	0.019275	0.01315	1.591666666666667	-0.458333333333333	1.91507180022056	4-4-1-3
270	0.19	0.019275	0.01315	1.675	-0.641666666666667	1.95469520215642	5-4-1-3
271	0.002	0.0254	0.01315	3.058333333333333	-2.875	3.34028441902782	1-5-1-3
272	0.049	0.0254	0.01315	3.233333333333333	-3.083333333333333	3.52443848955641	2-5-1-3
273	0.096	0.0254	0.01315	3.358333333333333	-3.241666666666667	3.67026338746054	3-5-1-3
274	0.143	0.0254	0.01315	3.525	-3.441666666666667	3.86231795687512	4-5-1-3
275	0.19	0.0254	0.01315	3.691666666666667	-3.658333333333333	4.04979423345598	5-5-1-3
276	0.002	9e-04	0.01315	9.016666666666667	9.016666666666667	9.88003036432581	1-1-2-3
277	0.049	9e-04	0.01315	8.808333333333333	8.808333333333333	9.66337587664546	2-1-2-3
278	0.096	9e-04	0.01315	8.633333333333333	8.633333333333333	9.47962727818627	3-1-2-3
279	0.143	9e-04	0.01315	8.425	8.425	9.26925922966159	4-1-2-3
280	0.19	9e-04	0.01315	8.25	8.25	9.0839602230158	5-1-2-3
281	0.002	0.007025	0.01315	6.016666666666667	6.016666666666667	6.83483723288273	1-2-2-3
282	0.049	0.007025	0.01315	5.825	5.825	6.6451109847767	2-2-2-3
283	0.096	0.007025	0.01315	5.641666666666667	5.641666666666667	6.46342272587314	3-2-2-3
284	0.143	0.007025	0.01315	5.441666666666667	5.441666666666667	6.26105688628792	4-2-2-3
285	0.19	0.007025	0.01315	5.241666666666667	5.241666666666667	6.05179036899807	5-2-2-3
286	0.002	0.01315	0.01315	3.05	3.05	3.97156560229506	1-3-2-3
287	0.049	0.01315	0.01315	2.85	2.85	3.77822709746251	2-3-2-3
288	0.096	0.01315	0.01315	2.633333333333333	2.633333333333333	3.59629438913631	3-3-2-3

289	0.143	0.01315	0.049	0.01315	2.45	2.45	3.43122912865541	4-3-2-3
290	0.19	0.01315	0.049	0.01315	2.25	2.25	3.27643098508118	5-3-2-3
291	0.002	0.019275	0.049	0.01315	0.0583333333333333	0.0583333333333333	1.96871362400257	1-4-2-3
292	0.049	0.019275	0.049	0.01315	-0.166666666666667	-0.166666666666667	1.96001700672894	2-4-2-3
293	0.096	0.019275	0.049	0.01315	-0.341666666666667	-0.341666666666667	1.94828984838841	3-4-2-3
294	0.143	0.019275	0.049	0.01315	1.675	1.675	1.99185842870421	4-4-2-3
295	0.19	0.019275	0.049	0.01315	-0.7333333333333333	-0.7333333333333333	2.04654179857958	5-4-2-3
296	0.002	0.0254	0.049	0.01315	-2.9583333333333333	-2.9583333333333333	3.43426362800916	1-5-2-3
297	0.049	0.0254	0.049	0.01315	-3.141666666666667	-3.141666666666667	3.59362862113862	2-5-2-3
298	0.096	0.0254	0.049	0.01315	-3.325	-3.325	3.76353114331032	3-5-2-3
299	0.143	0.0254	0.049	0.01315	-3.525	-3.525	3.95716649468615	4-5-2-3
300	0.19	0.0254	0.049	0.01315	-3.741666666666667	-3.741666666666667	4.14417261545253	5-5-2-3
301	0.002	9e-04	0.096	0.01315	8.9333333333333333	8.9333333333333333	9.82624037971797	1-1-3-3
302	0.049	9e-04	0.096	0.01315	8.741666666666667	8.741666666666667	9.61972799338249	2-1-3-3
303	0.096	9e-04	0.096	0.01315	8.5833333333333333	8.5833333333333333	9.43225847822249	3-1-3-3
304	0.143	9e-04	0.096	0.01315	8.341666666666667	8.341666666666667	9.21760091708611	4-1-3-3
305	0.19	9e-04	0.096	0.01315	8.175	8.175	9.03746830331002	5-1-3-3
306	0.002	0.007025	0.096	0.01315	5.941666666666667	5.941666666666667	6.79160020417378	1-2-3-3
307	0.049	0.007025	0.096	0.01315	5.741666666666667	5.741666666666667	6.60082065604977	2-2-3-3
308	0.096	0.007025	0.096	0.01315	5.566666666666667	5.566666666666667	6.4231352676607	3-2-3-3
309	0.143	0.007025	0.096	0.01315	5.3833333333333333	5.3833333333333333	6.23137224052616	4-2-3-3
310	0.19	0.007025	0.096	0.01315	5.166666666666667	5.166666666666667	6.01290279316072	5-2-3-3
311	0.002	0.01315	0.096	0.01315	2.9583333333333333	2.9583333333333333	3.944722212442	1-3-3-3
312	0.049	0.01315	0.096	0.01315	2.766666666666667	2.766666666666667	3.75477473802801	2-3-3-3
313	0.096	0.01315	0.096	0.01315	2.566666666666667	2.566666666666667	3.58282942193271	3-3-3-3
314	0.143	0.01315	0.096	0.01315	2.391666666666667	2.391666666666667	3.41601619824419	4-3-3-3
315	0.19	0.01315	0.096	0.01315	2.225	2.225	3.268409399808084	5-3-3-3
316	0.002	0.019275	0.096	0.01315	1.691666666666667	1.691666666666667	2.03510851471529	1-4-3-3
317	0.049	0.019275	0.096	0.01315	1.675	1.675	2.02093212816924	2-4-3-3
318	0.096	0.019275	0.096	0.01315	1.675	1.675	2.02258085952907	3-4-3-3
319	0.143	0.019275	0.096	0.01315	1.75	1.75	2.06841324046558	4-4-3-3
320	0.19	0.019275	0.096	0.01315	1.8333333333333333	1.8333333333333333	2.11305466091154	5-4-3-3
321	0.002	0.0254	0.096	0.01315	3.225	3.225	3.53211456967824	1-5-3-3
322	0.049	0.0254	0.096	0.01315	3.3833333333333333	3.3833333333333333	3.7	2-5-3-3
323	0.096	0.0254	0.096	0.01315	3.5333333333333333	3.5333333333333333	3.86996985345709	3-5-3-3
324	0.143	0.0254	0.096	0.01315	3.691666666666667	3.691666666666667	4.05123437979093	4-5-3-3
325	0.19	0.0254	0.096	0.01315	3.85	3.85	4.23162695268223	5-5-3-3
326	0.002	9e-04	0.143	0.01315	8.866666666666667	8.866666666666667	9.78400054510764	1-1-4-3
327	0.049	9e-04	0.143	0.01315	8.65	8.65	9.5619907271795	2-1-4-3
328	0.096	9e-04	0.143	0.01315	8.466666666666667	8.466666666666667	9.3751444433317	3-1-4-3
329	0.143	9e-04	0.143	0.01315	8.2583333333333333	8.2583333333333333	9.16501500271549	4-1-4-3
330	0.19	9e-04	0.143	0.01315	8.0833333333333333	8.0833333333333333	8.98146239020499	5-1-4-3
331	0.002	0.007025	0.143	0.01315	5.8583333333333333	5.8583333333333333	6.74802440224791	1-2-4-3
332	0.049	0.007025	0.143	0.01315	5.6583333333333333	5.6583333333333333	6.55775622196088	2-2-4-3
333	0.096	0.007025	0.143	0.01315	5.4833333333333333	5.4833333333333333	6.38096126509687	3-2-4-3
334	0.143	0.007025	0.143	0.01315	5.291666666666667	5.291666666666667	6.18593835511908	4-2-4-3
335	0.19	0.007025	0.143	0.01315	5.075	5.075	5.9685983837637	5-2-4-3
336	0.002	0.01315	0.143	0.01315	2.8833333333333333	2.8833333333333333	3.9274673773311	1-3-4-3
337	0.049	0.01315	0.143	0.01315	2.6833333333333333	2.6833333333333333	3.73697738821096	2-3-4-3



338	0.096	0.01315	0.143	0.01315	2.508333333333333	2.475	3.56662772564412	3-3-4-3
339	0.143	0.01315	0.143	0.01315	2.333333333333333	2.283333333333333	3.4039193096586	4-3-4-3
340	0.19	0.01315	0.143	0.01315	2.166666666666667	2.083333333333333	3.26113477182407	5-3-4-3
341	0.002	0.019275	0.143	0.01315	1.775	-0.108333333333333	2.09184926161837	1-4-4-3
342	0.049	0.019275	0.143	0.01315	1.758333333333333	-0.308333333333333	2.08066495781196	2-4-4-3
343	0.096	0.019275	0.143	0.01315	1.758333333333333	-0.508333333333333	2.10059515376	3-4-4-3
344	0.143	0.019275	0.143	0.01315	1.841666666666667	-0.708333333333333	2.16198211525134	4-4-4-3
345	0.19	0.019275	0.143	0.01315	1.925	-0.891666666666667	2.21189963605947	5-4-4-3
346	0.002	0.0254	0.143	0.01315	3.3	-3.116666666666667	3.61916196561211	1-5-4-3
347	0.049	0.0254	0.143	0.01315	3.466666666666667	-3.316666666666667	3.79627009927727	2-5-4-3
348	0.096	0.0254	0.143	0.01315	3.6	-3.483333333333333	3.95031644302074	3-5-4-3
349	0.143	0.0254	0.143	0.01315	3.766666666666667	-3.683333333333333	4.13823633931171	4-5-4-3
350	0.19	0.0254	0.143	0.01315	3.925	-3.891666666666667	4.7169614493656	5-5-4-3
351	0.002	9e-04	0.19	0.01315	8.783333333333333	8.783333333333333	9.73087868591526	1-1-5-3
352	0.049	9e-04	0.19	0.01315	8.566666666666667	8.566666666666667	9.51174712307541	2-1-5-3
353	0.096	9e-04	0.19	0.01315	8.383333333333333	8.383333333333333	9.32550266741691	3-1-5-3
354	0.143	9e-04	0.19	0.01315	8.191666666666667	8.191666666666667	9.12501141551797	4-1-5-3
355	0.19	9e-04	0.19	0.01315	8.008333333333333	8.008333333333333	8.93788752073628	5-1-5-3
356	0.002	0.007025	0.19	0.01315	5.775	5.775	6.70553254161567	1-2-5-3
357	0.049	0.007025	0.19	0.01315	5.591666666666667	5.591666666666667	6.52399417534994	2-2-5-3
358	0.096	0.007025	0.19	0.01315	5.408333333333333	5.408333333333333	6.34501116363609	3-2-5-3
359	0.143	0.007025	0.19	0.01315	5.216666666666667	5.216666666666667	6.14993224894931	4-2-5-3
360	0.19	0.007025	0.19	0.01315	5	5	5.93520569708133	5-2-5-3
361	0.002	0.01315	0.19	0.01315	2.8	2.8	3.90832444917256	1-3-5-3
362	0.049	0.01315	0.19	0.01315	2.6	2.6	3.72223051408695	2-3-5-3
363	0.096	0.01315	0.19	0.01315	2.45	2.4	3.55551215251287	3-3-5-3
364	0.143	0.01315	0.19	0.01315	2.3	2.2	3.39975489312588	4-3-5-3
365	0.19	0.01315	0.19	0.01315	2.158333333333333	2.158333333333333	3.25691571889725	5-3-5-3
366	0.002	0.019275	0.19	0.01315	1.858333333333333	-0.191666666666667	2.16159663212173	1-4-5-3
367	0.049	0.019275	0.19	0.01315	1.85	-0.4	2.16487105081727	2-4-5-3
368	0.096	0.019275	0.19	0.01315	1.85	-0.6	2.19241115365405	3-4-5-3
369	0.143	0.019275	0.19	0.01315	1.916666666666667	-0.783333333333333	2.23979165697765	4-4-5-3
370	0.19	0.019275	0.19	0.01315	2	-0.966666666666667	2.29818769178383	5-4-5-3
371	0.002	0.0254	0.19	0.01315	3.383333333333333	-3.2	3.72290209379726	1-5-5-3
372	0.049	0.0254	0.19	0.01315	3.558333333333333	-3.408333333333333	3.90565828851766	2-5-5-3
373	0.096	0.0254	0.19	0.01315	3.675	-3.558333333333333	4.03866727192688	3-5-5-3
374	0.143	0.0254	0.19	0.01315	3.841666666666667	-3.758333333333333	4.22837636293964	4-5-5-3
375	0.19	0.0254	0.19	0.01315	4.008333333333333	-3.975	4.4133207452147	5-5-5-3
376	0.002	9e-04	0.002	0.019275	8.008333333333333	8.008333333333333	9.31893234228042	1-1-1-4
377	0.049	9e-04	0.002	0.019275	7.8	7.8	9.11089091874847	2-1-1-4
378	0.096	9e-04	0.002	0.019275	7.633333333333333	7.633333333333333	8.93765442757028	3-1-1-4
379	0.143	9e-04	0.002	0.019275	7.425	7.425	8.75589339068039	4-1-1-4
380	0.19	9e-04	0.002	0.019275	7.25	7.25	8.55793978322665	5-1-1-4
381	0.002	0.007025	0.002	0.019275	5.008333333333333	5.008333333333333	6.41554102680878	1-2-1-4
382	0.049	0.007025	0.002	0.019275	4.825	4.825	6.24519815538306	2-2-1-4
383	0.096	0.007025	0.002	0.019275	4.633333333333333	4.633333333333333	6.0760458633336	3-2-1-4
384	0.143	0.007025	0.002	0.019275	4.441666666666667	4.441666666666667	5.89795162182035	4-2-1-4
385	0.19	0.007025	0.002	0.019275	4.266666666666667	4.233333333333333	5.69897651629951	5-2-1-4
386	0.002	0.01315	0.002	0.019275	2.883333333333333	2.033333333333333	3.92470805708314	1-3-1-4

387	0.049	0.01315	0.019275	2.825	1.825	3.77568978245477	2-3-1-4
388	0.096	0.01315	0.019275	2.76666666666667	1.63333333333333	3.648058844545464	3-3-1-4
389	0.143	0.01315	0.019275	2.71666666666667	1.45	3.53128871660192	4-3-1-4
390	0.19	0.01315	0.019275	2.71666666666667	1.25	3.43681053691743	5-3-1-4
391	0.002	0.019275	0.019275	2.63333333333333	-0.96666666666667	2.96647939483826	1-4-1-4
392	0.049	0.019275	0.019275	2.625	-1.175	3.01261237688046	2-4-1-4
393	0.096	0.019275	0.019275	2.60833333333333	-1.35833333333333	3.06417471216422	3-4-1-4
394	0.143	0.019275	0.019275	2.69166666666667	-1.55833333333333	3.15396575758203	4-4-1-4
395	0.19	0.019275	0.019275	2.76666666666667	-1.73333333333333	3.2272791262099	5-4-1-4
396	0.002	0.019275	0.019275	4.14166666666667	-3.95833333333333	4.664493354163986	1-5-1-4
397	0.049	0.0254	0.019275	4.31666666666667	-4.16666666666667	4.84372446229827	2-5-1-4
398	0.096	0.0254	0.019275	4.45833333333333	-4.34166666666667	5.00408166733251	3-5-1-4
399	0.143	0.0254	0.019275	4.61666666666667	-4.53333333333333	5.17558370299106	4-5-1-4
400	0.19	0.0254	0.019275	4.775	-4.74166666666667	5.3432979828317	5-5-1-4
401	0.002	9e-04	0.019275	7.925	7.925	9.28192688328596	1-1-2-4
402	0.049	9e-04	0.019275	7.73333333333333	7.73333333333333	9.08139122968869	2-1-2-4
403	0.096	9e-04	0.019275	7.55	7.55	8.90215329756421	3-1-2-4
404	0.143	9e-04	0.019275	7.33333333333333	7.33333333333333	8.69655104049876	4-1-2-4
405	0.19	9e-04	0.019275	7.16666666666667	7.16666666666667	8.52222584383524	5-1-2-4
406	0.002	0.007025	0.019275	4.93333333333333	4.93333333333333	6.39687423668779	1-2-2-4
407	0.049	0.007025	0.019275	4.74166666666667	4.74166666666667	6.22648911238642	2-2-2-4
408	0.096	0.007025	0.019275	4.56666666666667	4.55	6.05942791579095	3-2-2-4
409	0.143	0.007025	0.019275	4.4	4.36666666666667	5.88415952650277	4-2-2-4
410	0.19	0.007025	0.019275	4.21666666666667	4.15	5.6847749882178	5-2-2-4
411	0.002	0.01315	0.019275	2.94166666666667	1.95833333333333	3.94324316605845	1-3-2-4
412	0.049	0.01315	0.019275	2.88333333333333	1.75	3.79978069542616	2-3-2-4
413	0.096	0.01315	0.019275	2.8	1.58333333333333	3.67480158194516	3-3-2-4
414	0.143	0.01315	0.019275	2.8	1.36666666666667	3.56674454743631	4-3-2-4
415	0.19	0.01315	0.019275	2.80833333333333	1.15833333333333	3.48101996546989	5-3-2-4
416	0.002	0.019275	0.019275	2.70833333333333	-1.04166666666667	3.05409561081509	1-4-2-4
417	0.049	0.019275	0.019275	2.7	-1.25	3.10376115919594	2-4-2-4
418	0.096	0.019275	0.019275	2.68333333333333	-1.43333333333333	3.15673882353292	3-4-2-4
419	0.143	0.019275	0.019275	2.76666666666667	-1.63333333333333	3.24884594894864	4-4-2-4
420	0.19	0.019275	0.019275	2.84166666666667	-1.80833333333333	3.32402868018112	5-4-2-4
421	0.002	0.0254	0.019275	4.225	-4.04166666666667	4.77310171691323	1-5-2-4
422	0.049	0.0254	0.019275	4.38333333333333	-4.23333333333333	4.93136221883298	2-5-2-4
423	0.096	0.0254	0.019275	4.54166666666667	-4.6	5.11085446215536	3-5-2-4
424	0.143	0.0254	0.019275	4.68333333333333	-4.825	5.25991127933317	4-5-2-4
425	0.19	0.0254	0.019275	4.85833333333333	-4.825	5.44862367942584	5-5-2-4
426	0.002	9e-04	0.019275	7.85	7.85	9.24806286022466	1-1-3-4
427	0.049	9e-04	0.019275	7.64166666666667	7.64166666666667	9.04152457645649	2-1-3-4
428	0.096	9e-04	0.019275	7.46666666666667	7.46666666666667	8.86604007811078	3-1-3-4
429	0.143	9e-04	0.019275	7.25833333333333	7.25833333333333	8.66645833082927	4-1-3-4
430	0.19	9e-04	0.019275	7.08333333333333	7.08333333333333	8.49009226490894	5-1-3-4
431	0.002	0.007025	0.019275	4.85	4.85	6.3754738385995	1-2-3-4
432	0.049	0.007025	0.019275	4.66666666666667	4.65	6.20711956815183	2-2-3-4
433	0.096	0.007025	0.019275	4.50833333333333	4.475	6.0428332207114	3-2-3-4
434	0.143	0.007025	0.019275	4.35833333333333	4.29	5.87118670571234	4-2-3-4
435	0.19	0.007025	0.019275	4.15833333333333	4.075	5.67369661978267	5-2-3-4

436	0.002	0.01315	0.096	0.019275	3.016666666666667	1.866666666666667	3.96904690490467	1-3-3-4
437	0.049	0.01315	0.096	0.019275	2.941666666666667	1.675	3.82219395984383	2-3-3-4
438	0.096	0.01315	0.096	0.019275	2.891666666666667	1.475	3.70843632815773	3-3-3-4
439	0.143	0.01315	0.096	0.019275	2.883333333333333	1.283333333333333	3.60277670693036	4-3-3-4
440	0.19	0.01315	0.096	0.019275	2.883333333333333	1.083333333333333	3.52230984819148	5-3-3-4
441	0.002	0.019275	0.096	0.019275	2.791666666666667	-1.125	3.1534372780613	1-4-3-4
442	0.049	0.019275	0.096	0.019275	2.783333333333333	-1.333333333333333	3.20598398831518	2-4-3-4
443	0.096	0.019275	0.096	0.019275	2.766666666666667	-1.516666666666667	3.26139029658621	3-4-3-4
444	0.143	0.019275	0.096	0.019275	2.85	-1.716666666666667	3.35857112474933	4-4-3-4
445	0.19	0.019275	0.096	0.019275	2.925	-1.891666666666667	3.43183624317944	5-4-3-4
446	0.002	0.0254	0.096	0.019275	4.308333333333333	-4.125	4.88168345279918	1-5-3-4
447	0.049	0.0254	0.096	0.019275	4.475	-4.325	5.05082501511717	2-5-3-4
448	0.096	0.0254	0.096	0.019275	4.633333333333333	-4.516666666666667	5.22988208917435	3-5-3-4
449	0.143	0.0254	0.096	0.019275	4.775	-4.691666666666667	5.3781192499485	4-5-3-4
450	0.19	0.0254	0.096	0.019275	4.941666666666667	-4.908333333333333	5.55765238207645	5-5-3-4
451	0.002	9e-04	0.143	0.019275	7.766666666666667	7.766666666666667	9.20968692917047	1-1-4-4
452	0.049	9e-04	0.143	0.019275	7.566666666666667	7.566666666666667	9.00999445060872	2-1-4-4
453	0.096	9e-04	0.143	0.019275	7.391666666666667	7.391666666666667	8.83624165958959	3-1-4-4
454	0.143	9e-04	0.143	0.019275	7.175	7.175	8.63206232600298	4-1-4-4
455	0.19	9e-04	0.143	0.019275	6.991666666666667	6.991666666666667	8.45512664994834	5-1-4-4
456	0.002	0.007025	0.143	0.019275	4.783333333333333	4.766666666666667	6.35937627968865	1-2-4-4
457	0.049	0.007025	0.143	0.019275	4.633333333333333	4.583333333333333	6.19556292841901	2-2-4-4
458	0.096	0.007025	0.143	0.019275	4.466666666666667	4.4	6.03172170003447	3-2-4-4
459	0.143	0.007025	0.143	0.019275	4.308333333333333	4.208333333333333	5.86095839716794	4-2-4-4
460	0.19	0.007025	0.143	0.019275	4.091666666666667	3.975	5.65928440706067	5-2-4-4
461	0.002	0.01315	0.143	0.019275	3.075	1.791666666666667	3.99489257260651	1-3-4-4
462	0.049	0.01315	0.143	0.019275	3.008333333333333	1.591666666666667	3.8547589634978	2-3-4-4
463	0.096	0.01315	0.143	0.019275	2.975	1.391666666666667	3.74599786438807	3-3-4-4
464	0.143	0.01315	0.143	0.019275	2.966666666666667	1.2	3.64554522671164	4-3-4-4
465	0.19	0.01315	0.143	0.019275	2.958333333333333	1.008333333333333	3.56312129085347	5-3-4-4
466	0.002	0.019275	0.143	0.019275	2.866666666666667	-1.2	3.24371186554334	1-4-4-4
467	0.049	0.019275	0.143	0.019275	2.85	-1.4	3.28988348324577	2-4-4-4
468	0.096	0.019275	0.143	0.019275	2.85	-1.6	3.36798653995727	3-4-4-4
469	0.143	0.019275	0.143	0.019275	2.925	-1.791666666666667	3.45530992338845	4-4-4-4
470	0.19	0.019275	0.143	0.019275	3.008333333333333	-1.975	3.54153921339296	5-4-4-4
471	0.002	0.0254	0.143	0.019275	4.383333333333333	-4.2	4.98230201145347	1-5-4-4
472	0.049	0.0254	0.143	0.019275	4.583333333333333	-4.408333333333333	5.15921505657595	2-5-4-4
473	0.096	0.0254	0.143	0.019275	4.691666666666667	-4.575	5.30699224294389	3-5-4-4
474	0.143	0.0254	0.143	0.019275	4.85	-4.766666666666667	5.47372511793081	4-5-4-4
475	0.19	0.0254	0.143	0.019275	5.008333333333333	-4.975	5.64158665625194	5-5-4-4
476	0.002	9e-04	0.19	0.019275	7.683333333333333	7.683333333333333	9.173785114844	1-1-5-4
477	0.049	9e-04	0.19	0.019275	7.475	7.475	8.97334014363288	2-1-5-4
478	0.096	9e-04	0.19	0.019275	7.3	7.3	8.80056816347672	3-1-5-4
479	0.143	9e-04	0.19	0.019275	7.1	7.1	8.60445620981748	4-1-5-4
480	0.19	9e-04	0.19	0.019275	6.916666666666667	6.916666666666667	8.42931393016854	5-1-5-4
481	0.002	0.007025	0.19	0.019275	4.733333333333333	4.683333333333333	6.34402606131679	1-2-5-4
482	0.049	0.007025	0.19	0.019275	4.575	4.508333333333333	6.18081709808663	2-2-5-4
483	0.096	0.007025	0.19	0.019275	4.408333333333333	4.308333333333333	6.01934381805858	3-2-5-4
484	0.143	0.007025	0.19	0.019275	4.241666666666667	4.125	5.85	4-2-5-4

485	0.19	0.007025	0.19	0.019275	4.075	3.908333333333333	5.65427566831803	5-2-5-4
486	0.002	0.01315	0.19	0.019275	3.133333333333333	1.716666666666667	4.01891361771644	1-3-5-4
487	0.049	0.01315	0.19	0.019275	3.083333333333333	1.5	3.89337043361319	2-3-5-4
488	0.096	0.01315	0.19	0.019275	3.058333333333333	1.308333333333333	3.78384724850251	3-3-5-4
489	0.143	0.01315	0.19	0.019275	3.033333333333333	1.133333333333333	3.68057966449127	4-3-5-4
490	0.19	0.01315	0.19	0.019275	3.033333333333333	0.933333333333333	3.60693775937429	5-3-5-4
491	0.002	0.019275	0.19	0.019275	2.958333333333333	-1.291666666666667	3.35646143033602	1-4-5-4
492	0.049	0.019275	0.19	0.019275	2.941666666666667	-1.491666666666667	3.40551024077156	2-4-5-4
493	0.096	0.019275	0.19	0.019275	2.925	-1.675	3.46614579420235	3-4-5-4
494	0.143	0.019275	0.19	0.019275	3.008333333333333	-1.875	3.56288740583626	4-4-5-4
495	0.19	0.019275	0.19	0.019275	3.091666666666667	-2.058333333333333	3.65410727811869	5-4-5-4
496	0.002	0.0254	0.19	0.019275	4.475	-4.291666666666667	5.10351186276013	1-5-5-4
497	0.049	0.0254	0.19	0.019275	4.641666666666667	-4.491666666666667	5.2686968608242	2-5-5-4
498	0.096	0.0254	0.19	0.019275	4.775	-4.658333333333333	5.41517928296623	3-5-5-4
499	0.143	0.0254	0.19	0.019275	4.933333333333333	-4.85	5.58435314069589	4-5-5-4
500	0.19	0.0254	0.19	0.019275	5.108333333333333	-5.075	5.77126502597134	5-5-5-4
501	0.002	9e-04	0.002	0.0254	6.925	6.925	8.94347993419415	1-1-1-5
502	0.049	9e-04	0.002	0.0254	6.708333333333333	6.708333333333333	8.75152367686146	2-1-1-5
503	0.096	9e-04	0.002	0.0254	6.55	6.533333333333333	8.58331715208831	3-1-1-5
504	0.143	9e-04	0.002	0.0254	6.383333333333333	6.333333333333333	8.40366983327324	4-1-1-5
505	0.19	9e-04	0.002	0.0254	6.225	6.158333333333333	8.2399939320366	5-1-1-5
506	0.002	0.007025	0.002	0.0254	4.791666666666667	3.925	6.32369881214046	1-2-1-5
507	0.049	0.007025	0.002	0.0254	4.7	3.733333333333333	6.17535424085129	2-2-1-5
508	0.096	0.007025	0.002	0.0254	4.625	3.541666666666667	6.04145401924625	3-2-1-5
509	0.143	0.007025	0.002	0.0254	4.541666666666667	3.358333333333333	5.89342854372563	4-2-1-5
510	0.19	0.007025	0.002	0.0254	4.433333333333333	3.133333333333333	5.72465428359361	5-2-1-5
511	0.002	0.01315	0.002	0.0254	3.85	0.95	4.45065538245025	1-3-1-5
512	0.049	0.01315	0.002	0.0254	3.841666666666667	0.741666666666667	4.36739813756094	2-3-1-5
513	0.096	0.01315	0.002	0.0254	3.808333333333333	0.558333333333333	4.29039625209607	3-3-1-5
514	0.143	0.01315	0.002	0.0254	3.816666666666667	0.35	4.24892143176752	4-3-1-5
515	0.19	0.01315	0.002	0.0254	3.808333333333333	0.158333333333333	4.21772055341113	5-3-1-5
516	0.002	0.019275	0.002	0.0254	3.725	-2.058333333333333	4.34655035631706	1-4-1-5
517	0.049	0.019275	0.002	0.0254	3.7	-2.25	4.40037877157562	2-4-1-5
518	0.096	0.019275	0.002	0.0254	3.691666666666667	-2.441666666666667	4.4867397220402	3-4-1-5
519	0.143	0.019275	0.002	0.0254	3.783333333333333	-2.65	4.60434577328853	4-4-1-5
520	0.19	0.019275	0.002	0.0254	3.85	-2.816666666666667	4.68045581825816	5-4-1-5
521	0.002	0.0254	0.002	0.0254	5.225	-5.041666666666667	6.10757726107497	1-5-1-5
522	0.049	0.0254	0.002	0.0254	5.4	-5.25	6.27959659001542	2-5-1-5
523	0.096	0.0254	0.002	0.0254	5.541666666666667	-5.425	6.43279358702993	3-5-1-5
524	0.143	0.0254	0.002	0.0254	5.691666666666667	-5.608333333333333	6.58514742937975	4-5-1-5
525	0.19	0.0254	0.002	0.0254	5.875	-5.841666666666667	6.7769831045975	5-5-1-5
526	0.002	9e-04	0.049	0.0254	6.841666666666667	6.841666666666667	8.92445143038682	1-1-2-5
527	0.049	9e-04	0.049	0.0254	6.675	6.641666666666667	8.73808712858064	2-1-2-5
528	0.096	9e-04	0.049	0.0254	6.5	6.45	8.56893614555895	3-1-2-5
529	0.143	9e-04	0.049	0.0254	6.341666666666667	6.258333333333333	8.39131495456264	4-1-2-5
530	0.19	9e-04	0.049	0.0254	6.183333333333333	6.083333333333333	8.22860863086828	5-1-2-5
531	0.002	0.007025	0.049	0.0254	4.825	3.841666666666667	6.33067926845137	1-2-2-5
532	0.049	0.007025	0.049	0.0254	4.741666666666667	3.641666666666667	6.18688128219703	2-2-2-5
533	0.096	0.007025	0.049	0.0254	4.666666666666667	3.466666666666667	6.05419964432404	3-2-2-5

534	0.143	0.007025	0.049	0.0254	4.591666666666667	3.275	5.91121814857141	4-2-2-5
535	0.19	0.007025	0.049	0.0254	4.491666666666667	3.058333333333333	5.74332946411168	5-2-2-5
536	0.002	0.01315	0.049	0.0254	3.933333333333333	0.866666666666667	4.50961934831164	1-3-2-5
537	0.049	0.01315	0.049	0.0254	3.916666666666667	0.666666666666667	4.42398764314127	2-3-2-5
538	0.096	0.01315	0.049	0.0254	3.9	0.466666666666667	4.36558510778719	3-3-2-5
539	0.143	0.01315	0.049	0.0254	3.9	0.266666666666667	4.32338601869723	4-3-2-5
540	0.19	0.01315	0.049	0.0254	3.875	0.091666666666667	4.2797001452594	5-3-2-5
541	0.002	0.019275	0.049	0.0254	3.791666666666667	-2.125	4.43348997217016	1-4-2-5
542	0.049	0.019275	0.049	0.0254	3.791666666666667	-2.341666666666667	4.52354949127342	2-4-2-5
543	0.096	0.019275	0.049	0.0254	3.766666666666667	-2.516666666666667	4.58621121769739	3-4-2-5
544	0.143	0.019275	0.049	0.0254	3.85	-2.716666666666667	4.69450032839847	4-4-2-5
545	0.19	0.019275	0.049	0.0254	3.933333333333333	-2.9	4.79565775815303	5-4-2-5
546	0.002	0.0254	0.049	0.0254	5.316666666666667	-5.133333333333333	6.23270941619026	1-5-2-5
547	0.049	0.0254	0.049	0.0254	5.475	-5.325	6.38233238453363	2-5-2-5
548	0.096	0.0254	0.049	0.0254	5.625	-5.508333333333333	6.5452909280897	3-5-2-5
549	0.143	0.0254	0.049	0.0254	5.775	-5.691666666666667	6.69695204303172	4-5-2-5
550	0.19	0.0254	0.049	0.0254	5.95	-5.916666666666667	6.87871111958241	5-5-2-5
551	0.002	9e-04	0.096	0.0254	6.791666666666667	6.758333333333333	8.90884392050955	1-1-3-5
552	0.049	9e-04	0.096	0.0254	6.616666666666667	6.55	8.72056955326505	2-1-3-5
553	0.096	9e-04	0.096	0.0254	6.458333333333333	6.375	8.55389774703127	3-1-3-5
554	0.143	9e-04	0.096	0.0254	6.283333333333333	6.166666666666667	8.37695250871899	4-1-3-5
555	0.19	9e-04	0.096	0.0254	6.125	5.991666666666667	8.21578764736934	5-1-3-5
556	0.002	0.007025	0.096	0.0254	4.866666666666667	3.766666666666667	6.33942689312948	1-2-3-5
557	0.049	0.007025	0.096	0.0254	4.775	3.558333333333333	6.19885742160064	2-2-3-5
558	0.096	0.007025	0.096	0.0254	4.7	3.383333333333333	6.06753656766896	3-2-3-5
559	0.143	0.007025	0.096	0.0254	4.633333333333333	3.2	5.92649418571666	4-2-3-5
560	0.19	0.007025	0.096	0.0254	4.566666666666667	2.966666666666667	5.76700384370718	5-2-3-5
561	0.002	0.01315	0.096	0.0254	4.008333333333333	0.791666666666667	4.56590626272594	1-3-3-5
562	0.049	0.01315	0.096	0.0254	3.991666666666667	0.591666666666667	4.48302333328644	2-3-3-5
563	0.096	0.01315	0.096	0.0254	3.983333333333333	0.383333333333333	4.43621460256377	3-3-3-5
564	0.143	0.01315	0.096	0.0254	3.983333333333333	0.183333333333333	4.39621048934951	4-3-3-5
565	0.19	0.01315	0.096	0.0254	3.966666666666667	5.5111512312578e-17	4.366157731156	5-3-3-5
566	0.002	0.019275	0.096	0.0254	3.875	-2.208333333333333	4.54523560078756	1-4-3-5
567	0.049	0.019275	0.096	0.0254	3.866666666666667	-2.416666666666667	4.62457205227323	2-4-3-5
568	0.096	0.019275	0.096	0.0254	3.858333333333333	-2.608333333333333	4.7087684164758	3-4-3-5
569	0.143	0.019275	0.096	0.0254	3.933333333333333	-2.8	4.80971239611407	4-4-3-5
570	0.19	0.019275	0.096	0.0254	4.016666666666667	-2.983333333333333	4.90934483069449	5-4-3-5
571	0.002	0.0254	0.096	0.0254	5.4	-5.216666666666667	6.34665266104897	1-5-3-5
572	0.049	0.0254	0.096	0.0254	5.566666666666667	-5.416666666666667	6.50602285066179	2-5-3-5
573	0.096	0.0254	0.096	0.0254	5.7	-5.583333333333333	6.64830805543786	3-5-3-5
574	0.143	0.0254	0.096	0.0254	6.041666666666667	-5.783333333333333	6.82080151692844	4-5-3-5
575	0.19	0.0254	0.096	0.0254	6.741666666666667	-6.008333333333333	7.00184499495193	5-5-3-5
576	0.002	9e-04	0.143	0.0254	6.416666666666667	6.675	8.89189706043279	1-1-4-5
577	0.049	9e-04	0.143	0.0254	6.583333333333333	6.475	8.70761161283621	2-1-4-5
578	0.096	9e-04	0.143	0.0254	6.408333333333333	6.291666666666667	8.54268693093689	3-1-4-5
579	0.143	9e-04	0.143	0.0254	6.241666666666667	6.091666666666667	8.36665006638459	4-1-4-5
580	0.19	9e-04	0.143	0.0254	6.108333333333333	5.908333333333333	8.20777070829832	5-1-4-5
581	0.002	0.007025	0.143	0.0254	4.908333333333333	3.675	6.35288648306159	1-2-4-5
582	0.049	0.007025	0.143	0.0254	4.816666666666667	3.483333333333333	6.21342632262318	2-2-4-5

583	0.096	0.007025	0.143	0.0254	4.741666666666667	3.308333333333333	6.08488564669323	3-2-4-5
584	0.143	0.007025	0.143	0.0254	4.7	3.116666666666667	5.948809040469043	4-2-4-5
585	0.19	0.007025	0.143	0.0254	4.616666666666667	2.9	5.78475006662633	5-2-4-5
586	0.002	0.01315	0.143	0.0254	4.091666666666667	0.7083333333333333	4.62970481420432	1-3-4-5
587	0.049	0.01315	0.143	0.0254	4.083333333333333	0.5	4.55832571620045	2-3-4-5
588	0.096	0.01315	0.143	0.0254	4.066666666666667	0.3	4.51054320453756	3-3-4-5
589	0.143	0.01315	0.143	0.0254	4.058333333333333	0.1083333333333333	4.46588923582602	4-3-4-5
590	0.19	0.01315	0.143	0.0254	4.05	-0.0833333333333334	4.44822061802994	5-3-4-5
591	0.002	0.019275	0.143	0.0254	3.958333333333333	-2.291666666666667	4.65573123508363	1-4-4-5
592	0.049	0.019275	0.143	0.0254	3.95	-2.5	4.73814309619285	2-4-4-5
593	0.096	0.019275	0.143	0.0254	3.941666666666667	-2.691666666666667	4.82173896708093	3-4-4-5
594	0.143	0.019275	0.143	0.0254	4.016666666666667	-2.883333333333333	4.92476733799002	4-4-4-5
595	0.19	0.019275	0.143	0.0254	4.1	-3.066666666666667	5.02510364735561	5-4-4-5
596	0.002	0.0254	0.143	0.0254	5.475	-5.291666666666667	6.45012919767245	1-5-4-5
597	0.049	0.0254	0.143	0.0254	5.65	-5.5	6.6192899213662	2-5-4-5
598	0.096	0.0254	0.143	0.0254	5.783333333333333	-5.666666666666667	6.7610403538706	3-5-4-5
599	0.143	0.0254	0.143	0.0254	5.941666666666667	-5.858333333333333	6.92140400015296	4-5-4-5
600	0.19	0.0254	0.143	0.0254	6.108333333333333	-6.075	7.09031028940201	5-5-4-5
601	0.002	9e-04	0.19	0.0254	6.691666666666667	6.591666666666667	8.87951762954122	1-1-5-5
602	0.049	9e-04	0.19	0.0254	6.508333333333333	6.391666666666667	8.69401134881554	2-1-5-5
603	0.096	9e-04	0.19	0.0254	6.366666666666667	6.2	8.53033801596787	3-1-5-5
604	0.143	9e-04	0.19	0.0254	6.208333333333333	6.008333333333333	8.35578641820545	4-1-5-5
605	0.19	9e-04	0.19	0.0254	6.116666666666667	5.833333333333333	8.19939022122987	5-1-5-5
606	0.002	0.007025	0.19	0.0254	4.941666666666667	3.608333333333333	6.36494304766351	1-2-5-5
607	0.049	0.007025	0.19	0.0254	4.85	3.4	6.23030229336159	2-2-5-5
608	0.096	0.007025	0.19	0.0254	4.816666666666667	3.216666666666667	6.10682678101593	3-2-5-5
609	0.143	0.007025	0.19	0.0254	4.766666666666667	3.033333333333333	5.97062252477355	4-2-5-5
610	0.19	0.007025	0.19	0.0254	4.683333333333333	2.816666666666667	5.80990533485701	5-2-5-5
611	0.002	0.01315	0.19	0.0254	4.166666666666667	0.633333333333333	4.68863875056858	1-3-5-5
612	0.049	0.01315	0.19	0.0254	4.166666666666667	0.416666666666667	4.6306946923041	2-3-5-5
613	0.096	0.01315	0.19	0.0254	4.141666666666667	0.225	4.57447629060785	3-3-5-5
614	0.143	0.01315	0.19	0.0254	4.133333333333333	0.0333333333333333	4.53578365151308	4-3-5-5
615	0.19	0.01315	0.19	0.0254	4.125	-0.1583333333333333	4.51931041937447	5-3-5-5
616	0.002	0.019275	0.19	0.0254	4.041666666666667	-2.375	4.7683854709954	1-4-5-5
617	0.049	0.019275	0.19	0.0254	4.016666666666667	-2.566666666666667	4.82700735445887	2-4-5-5
618	0.096	0.019275	0.19	0.0254	4.016666666666667	-2.766666666666667	4.92595168470013	3-4-5-5
619	0.143	0.019275	0.19	0.0254	4.1	-2.966666666666667	5.03818750478119	4-4-5-5
620	0.19	0.019275	0.19	0.0254	4.175	-3.141666666666667	5.12924620842738	5-4-5-5
621	0.002	0.0254	0.19	0.0254	5.55	-5.366666666666667	6.55260762343257	1-5-5-5
622	0.049	0.0254	0.19	0.0254	5.733333333333333	-5.583333333333333	6.7331270595467	2-5-5-5
623	0.096	0.0254	0.19	0.0254	5.858333333333333	-5.741666666666667	6.86227610442289	3-5-5-5
624	0.143	0.0254	0.19	0.0254	6.025	-5.941666666666667	7.03580130475556	4-5-5-5
625	0.19	0.0254	0.19	0.0254	6.191666666666667	-6.158333333333333	7.2022565908193	5-5-5-5

## A.4. Resultados del Modelo de Índice de Temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para el año 2004-2006

A continuación se muestran las gráficas del Balance de masa del modelo de Índice de Temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI, para dos años hidrológicos 2004–2005.

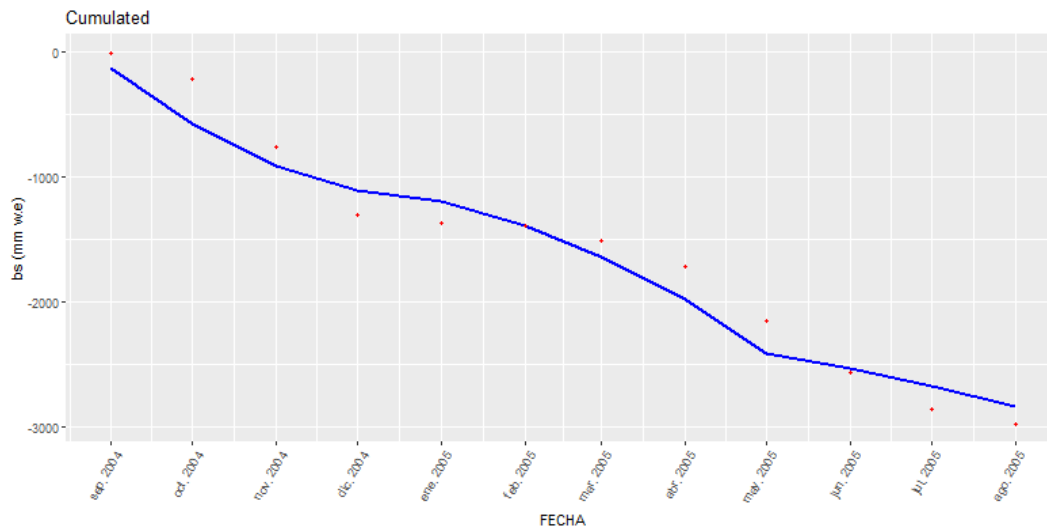


Figura A.1: Estaca 6K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

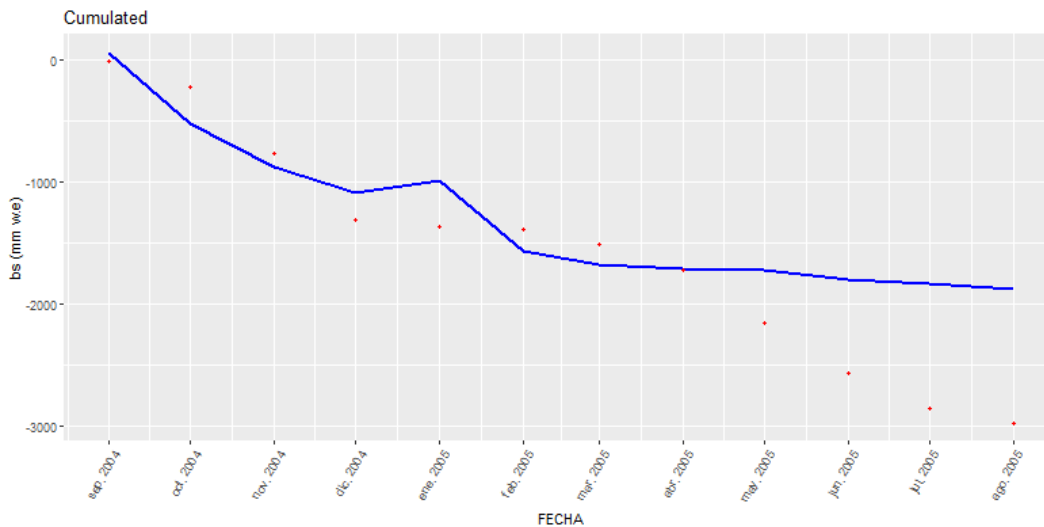


Figura A.2: Estaca 6K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

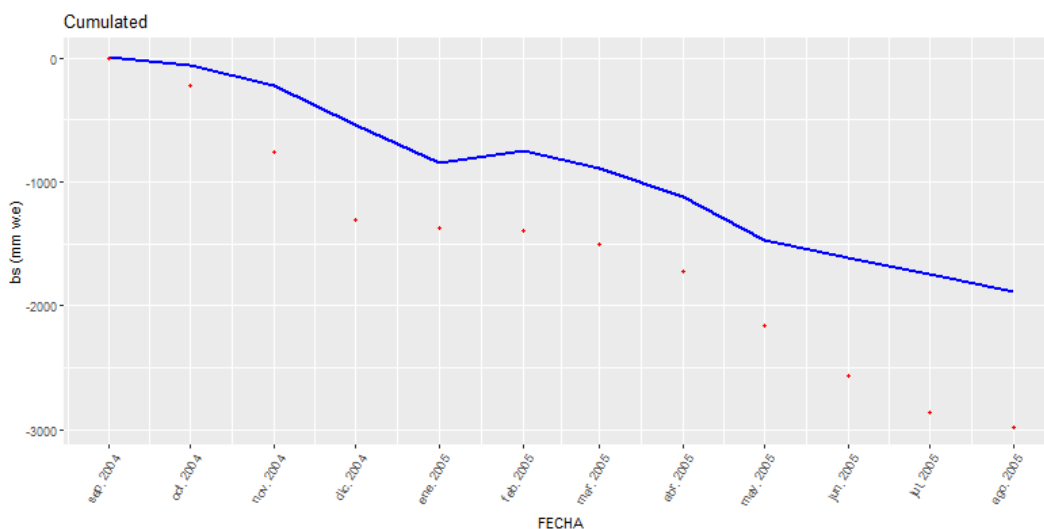


Figura A.3: Estaca 6K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.



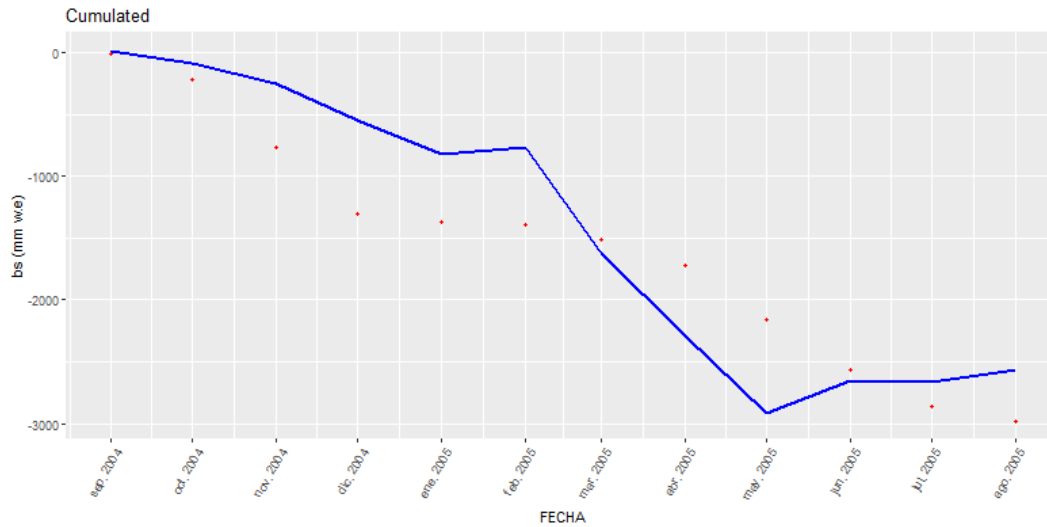


Figura A.4: Estaca 6K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

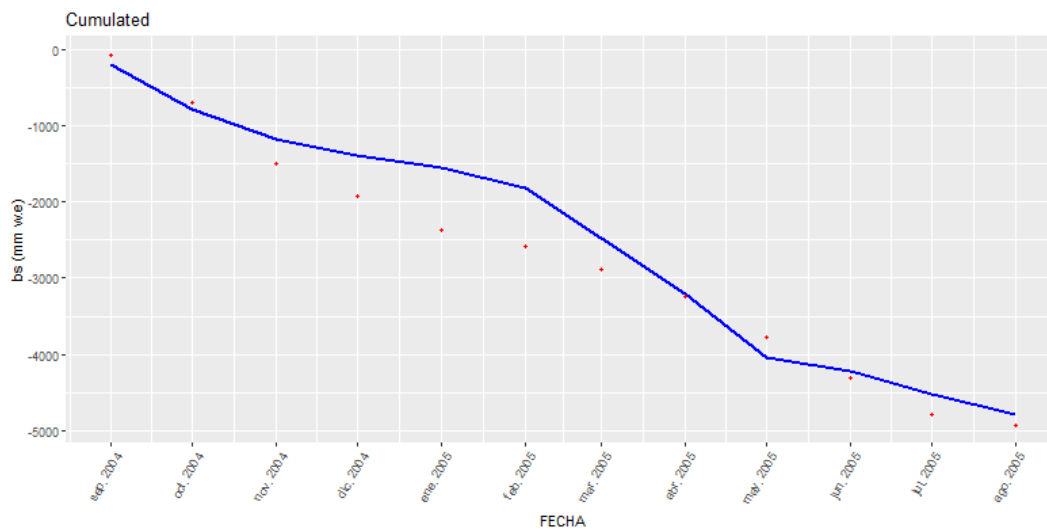


Figura A.5: Estaca 9K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

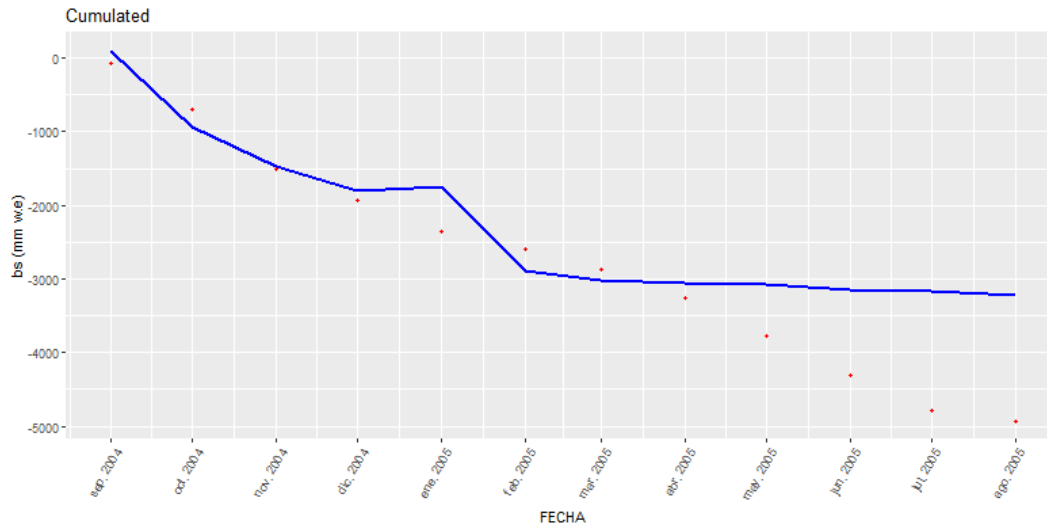


Figura A.6: Estaca 9K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

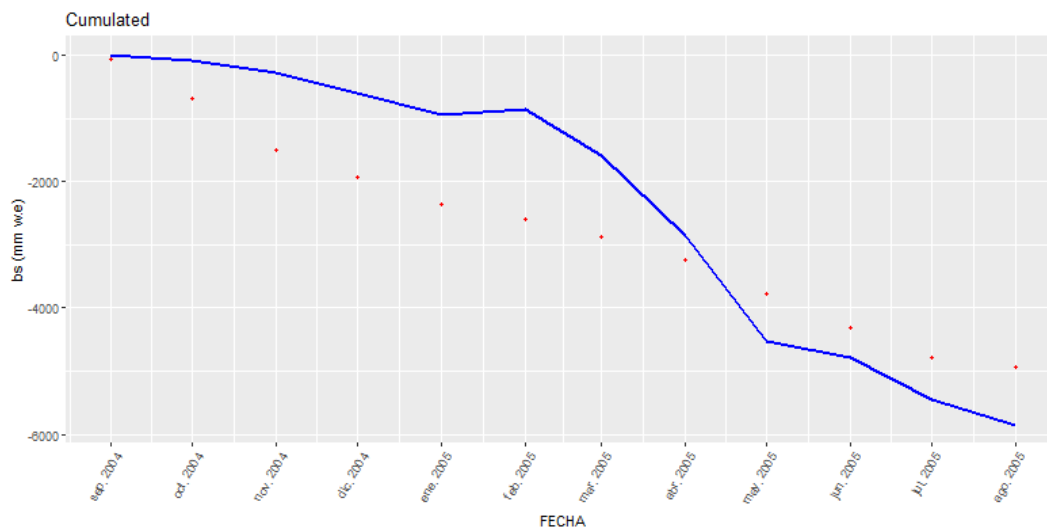


Figura A.7: Estaca 9K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

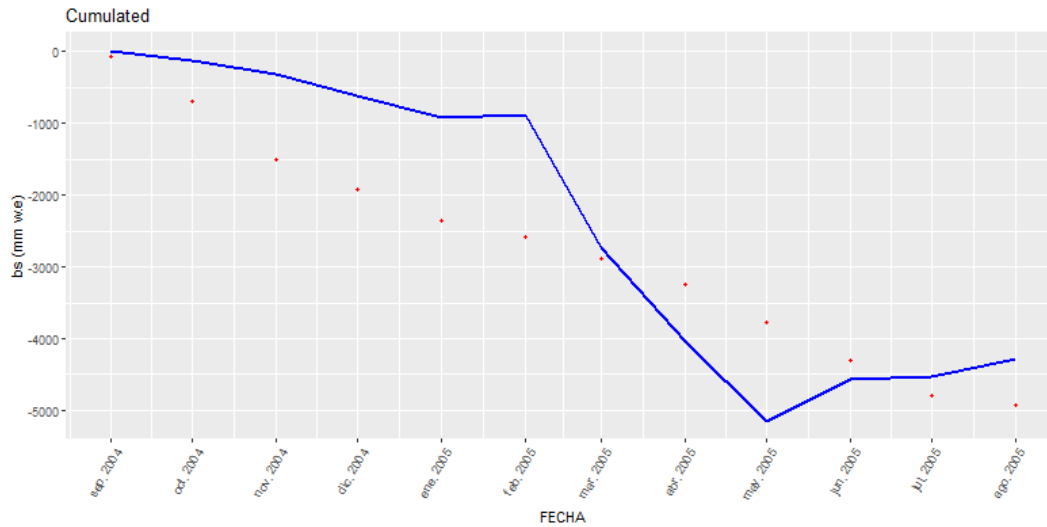


Figura A.8: Estaca 9K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

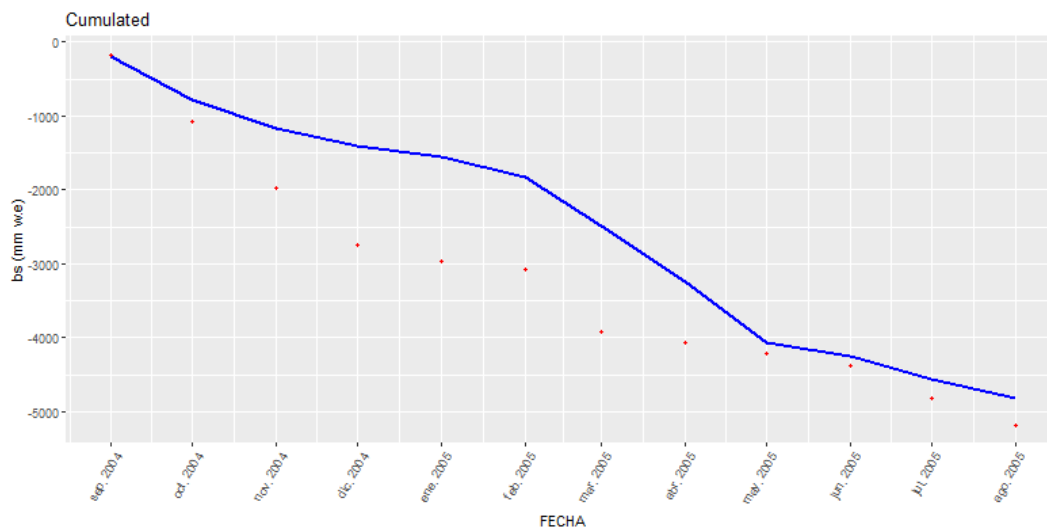


Figura A.9: Estaca 10K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

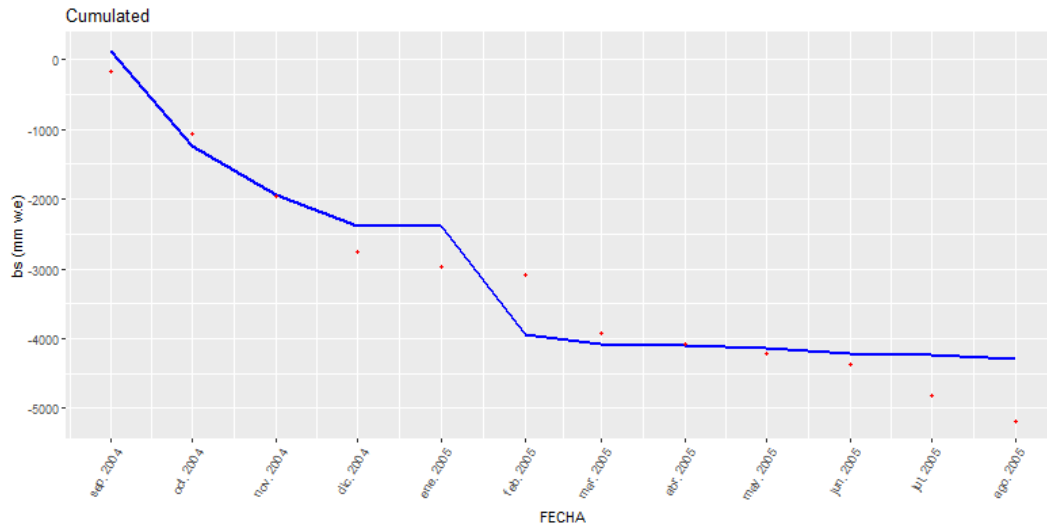


Figura A.10: Estaca 10K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

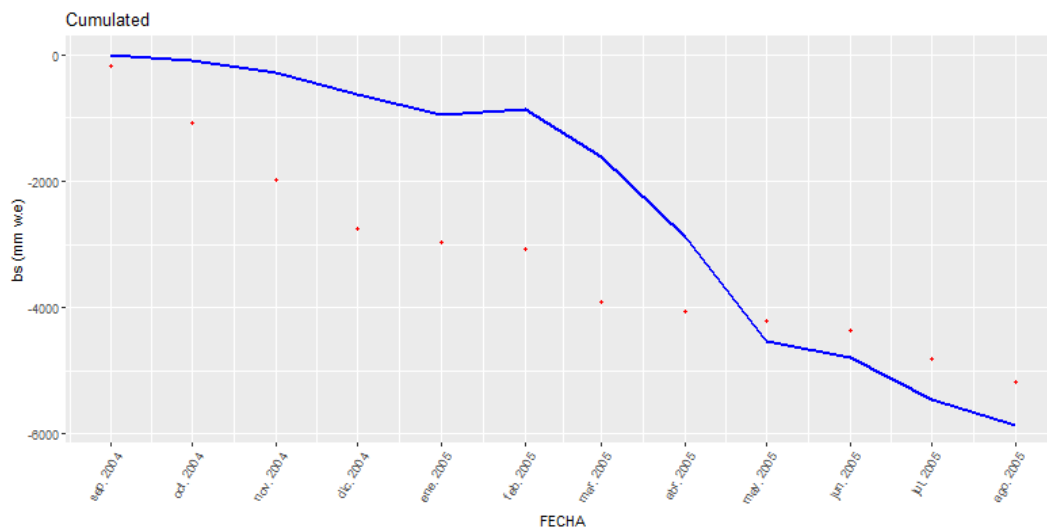


Figura A.11: Estaca 10K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

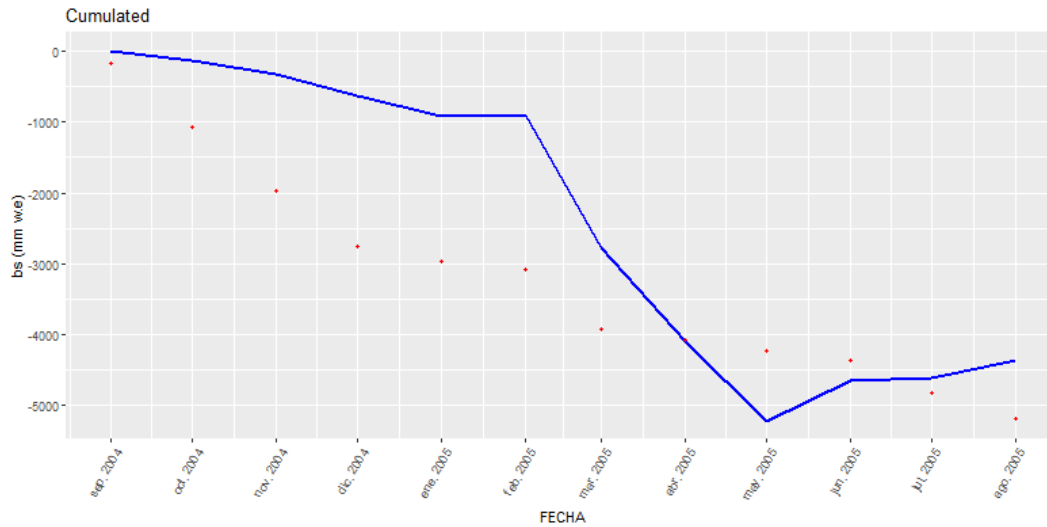


Figura A.12: Estaca 10K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

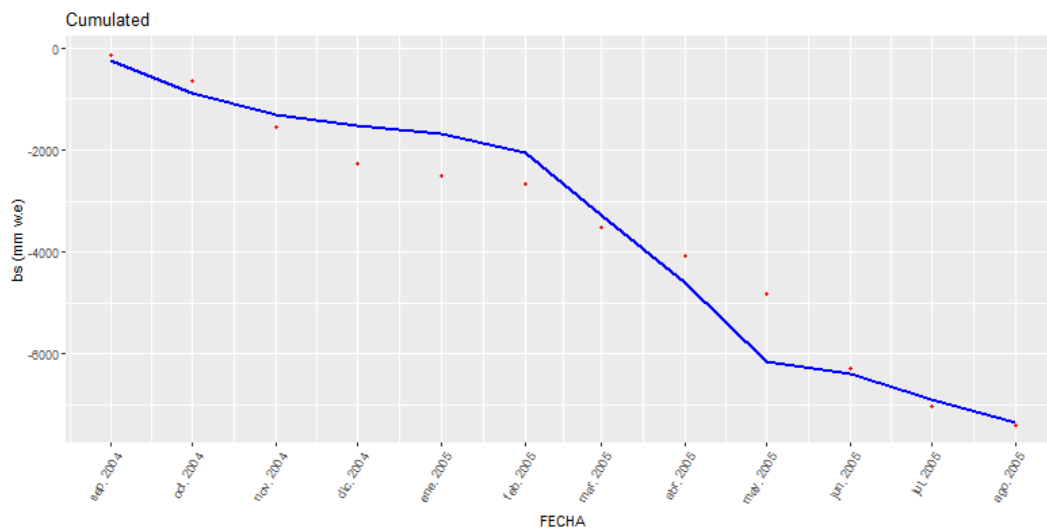


Figura A.13: Estaca 11K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

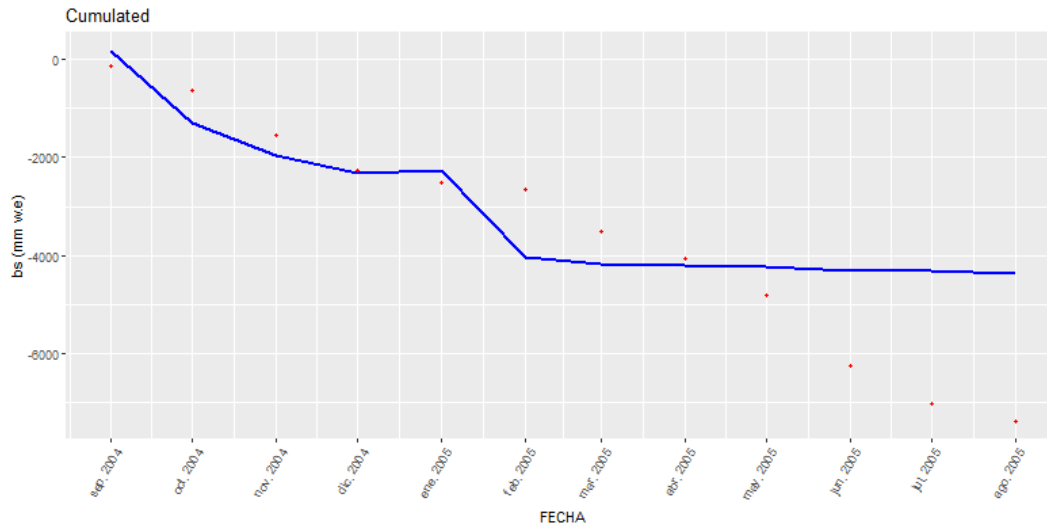


Figura A.14: Estaca 11K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

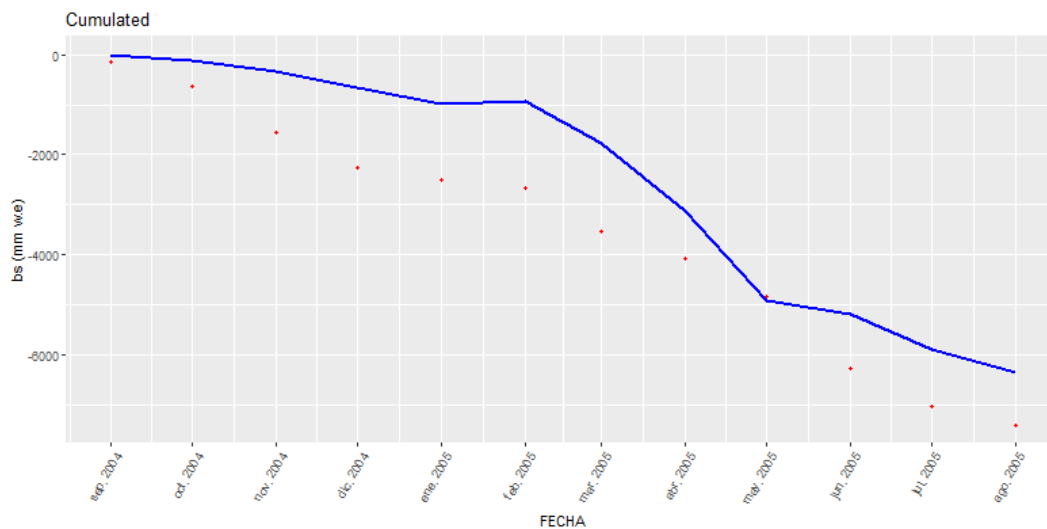


Figura A.15: Estaca 11K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

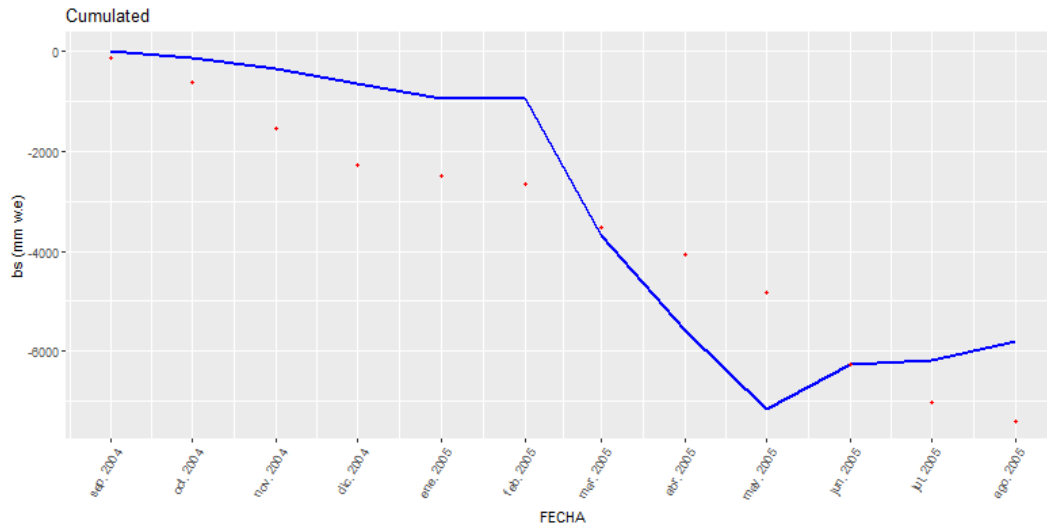


Figura A.16: Estaca 11K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

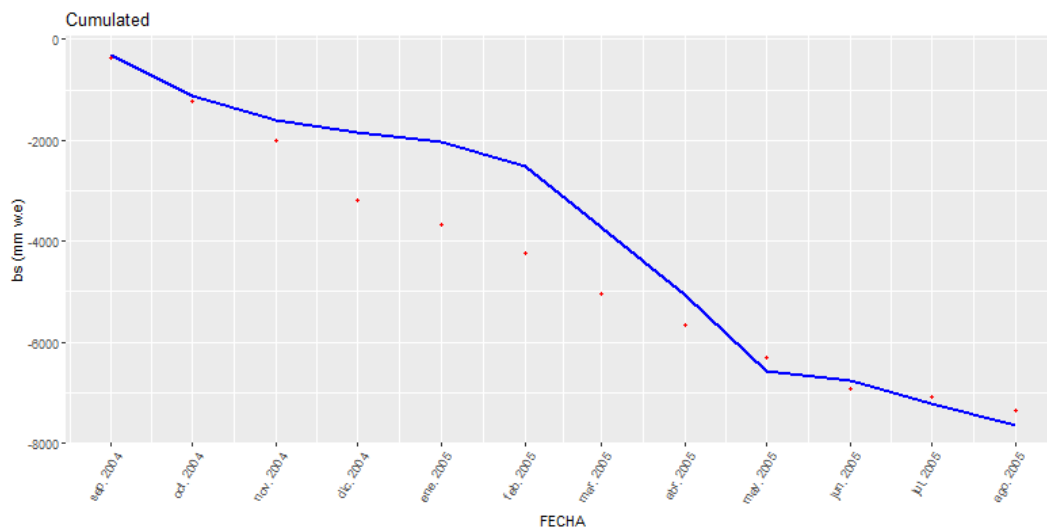


Figura A.17: Estaca 12K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

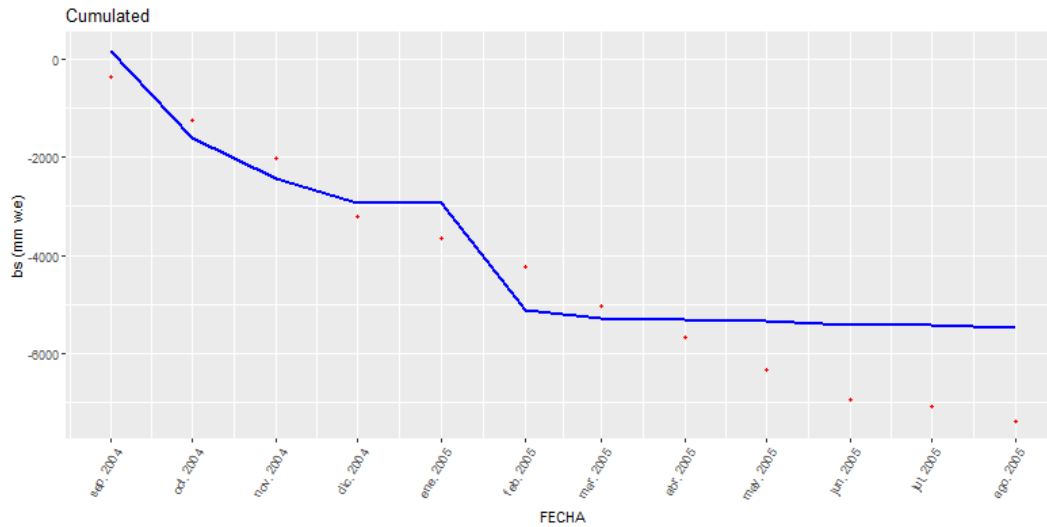


Figura A.18: Estaca 12K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

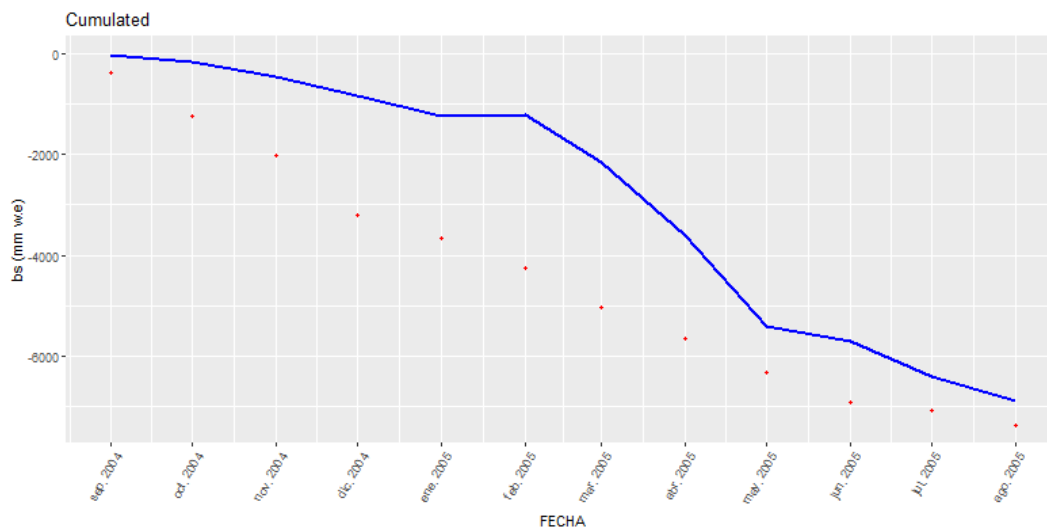


Figura A.19: Estaca 12K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.



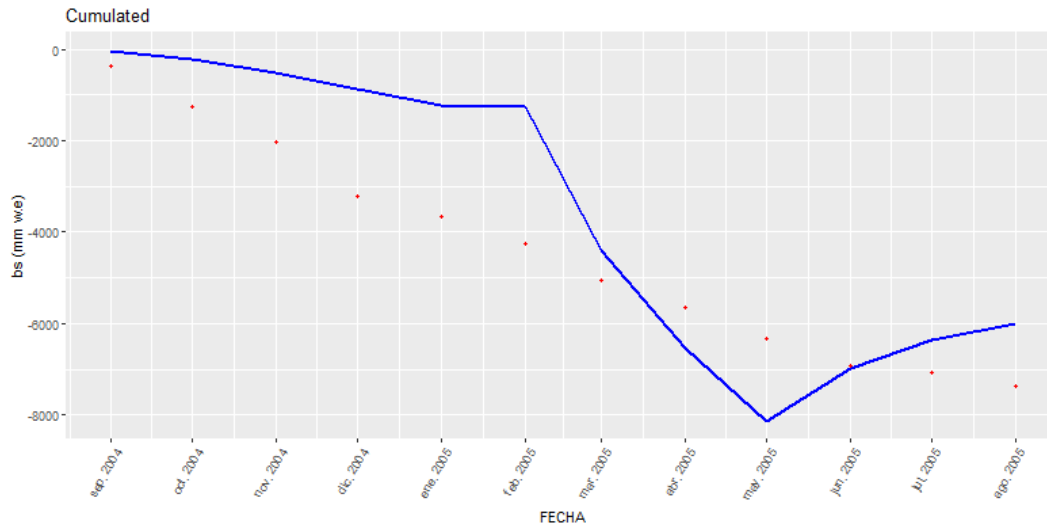


Figura A.20: Estaca 12K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

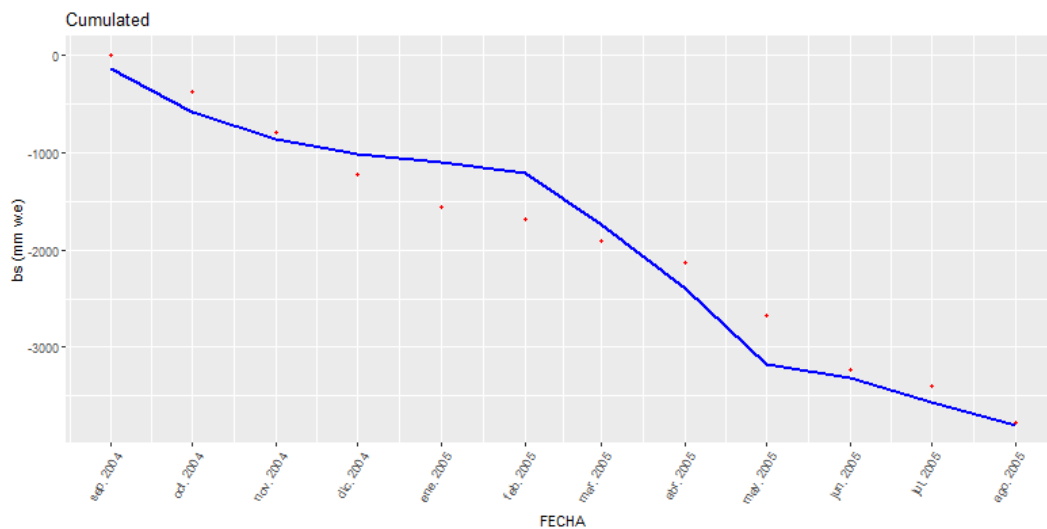


Figura A.21: Estaca 4F Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

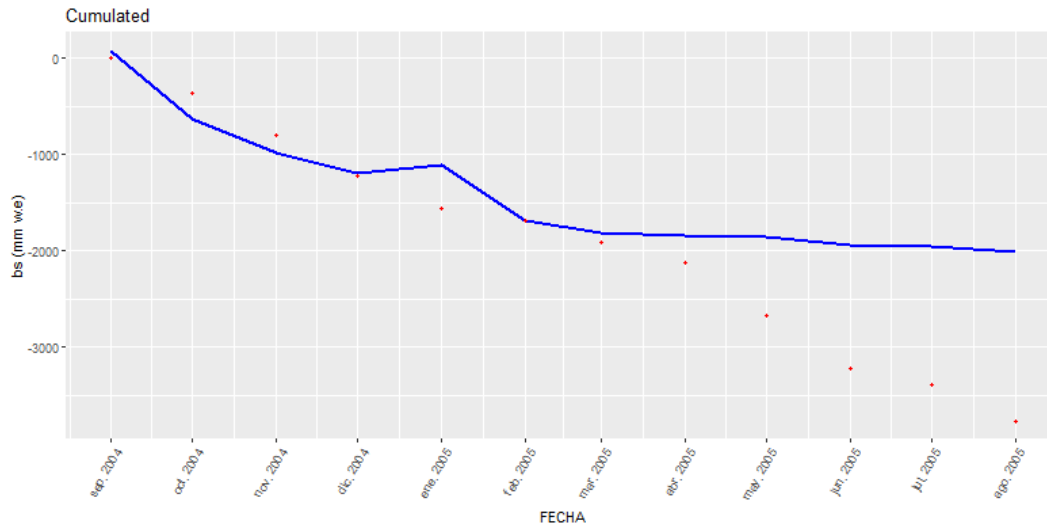


Figura A.22: Estaca 4F Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

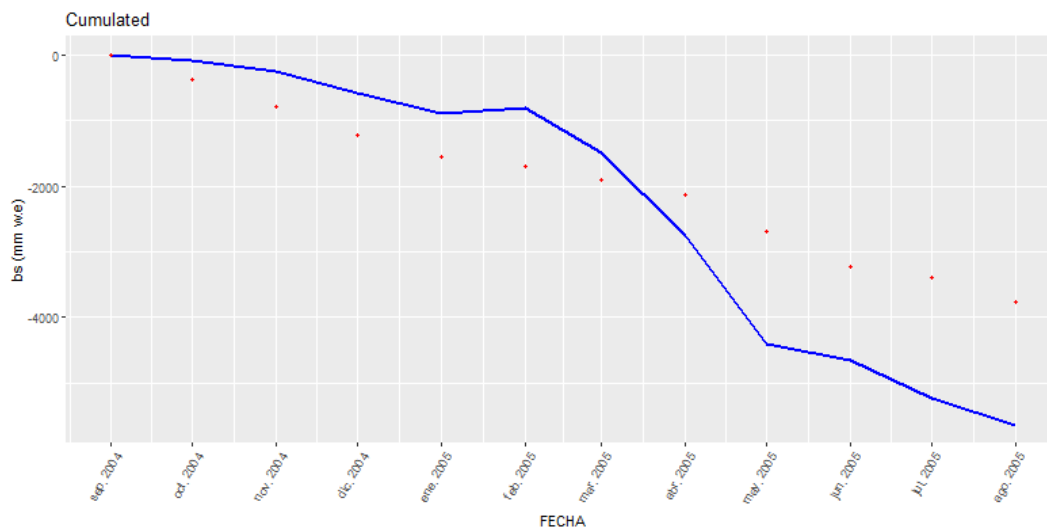


Figura A.23: Estaca 4F Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

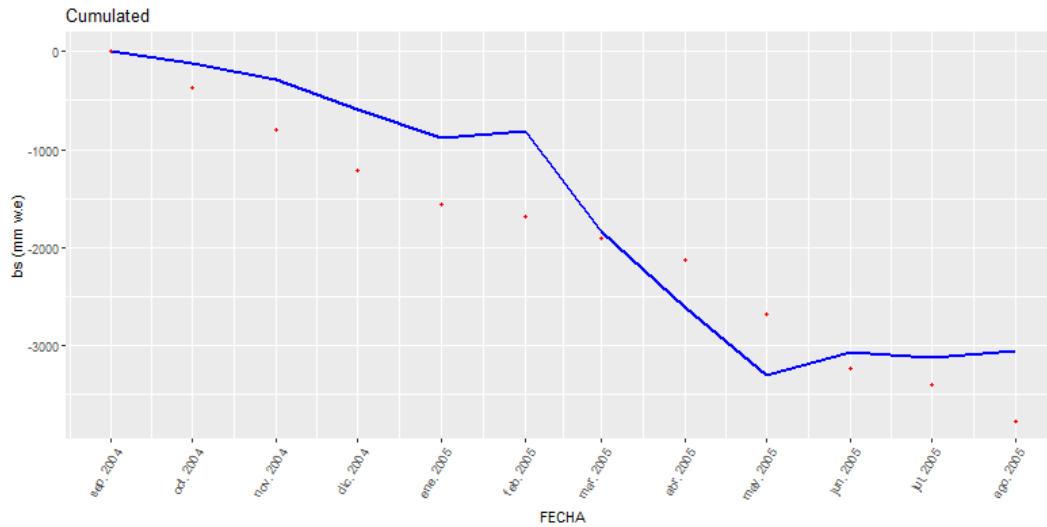


Figura A.24: Estaca 4F Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

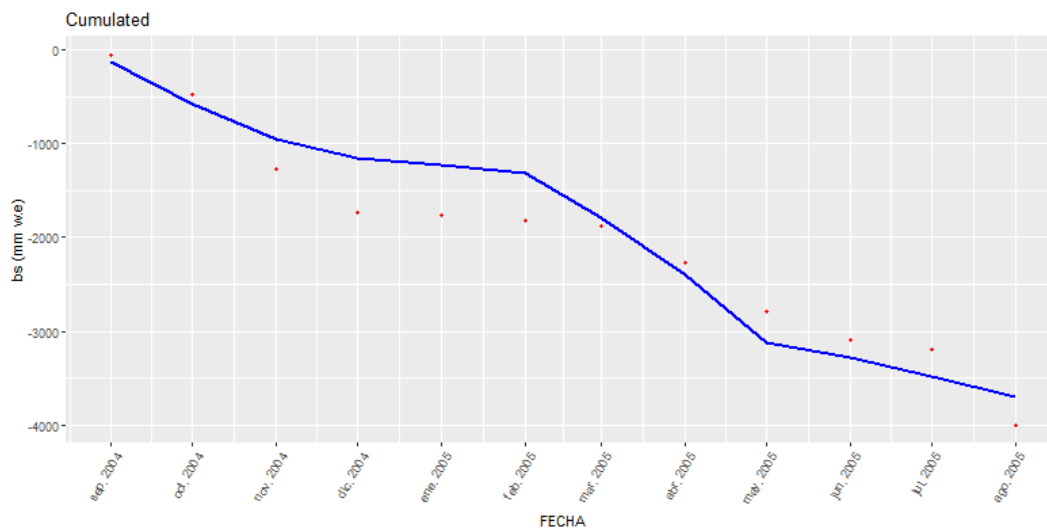


Figura A.25: Estaca 2G Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

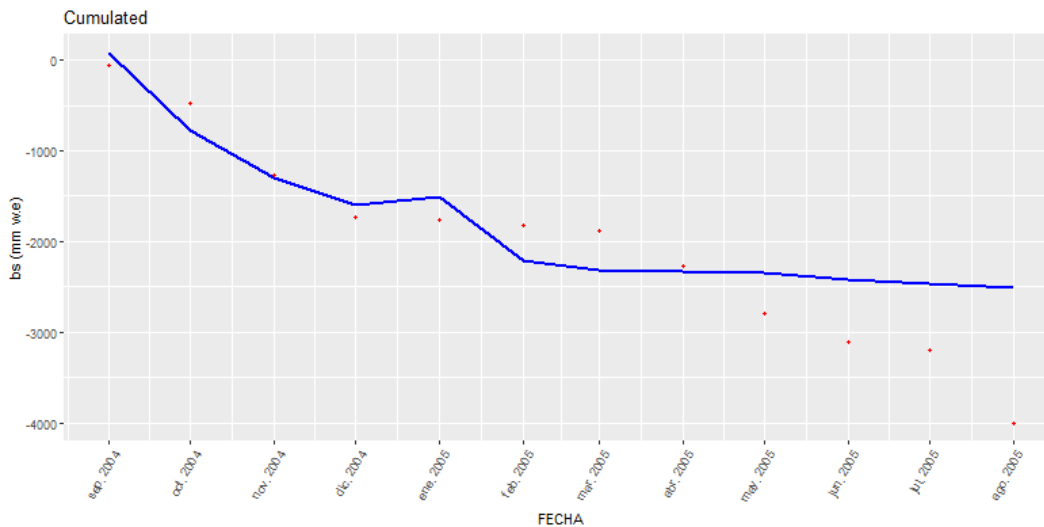


Figura A.26: Estaca 2G Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

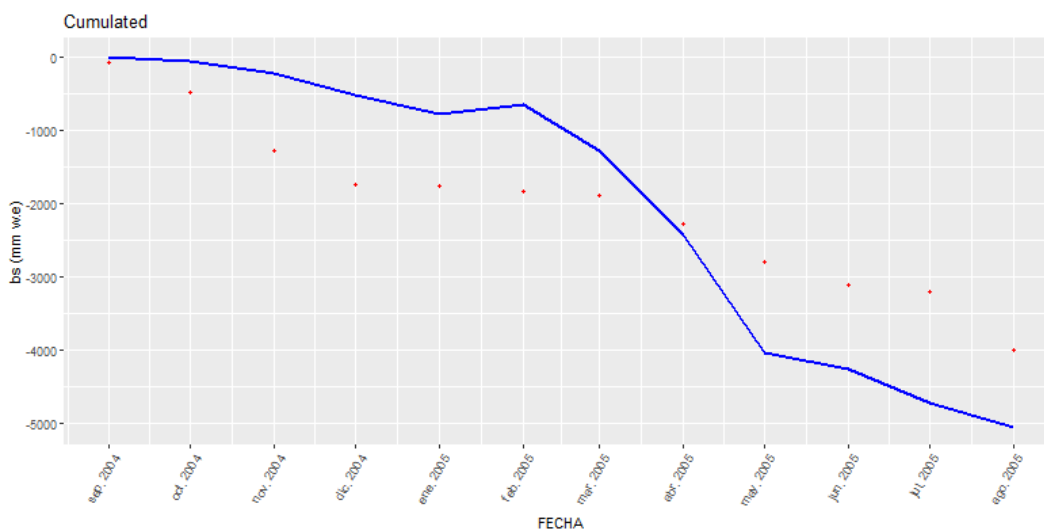


Figura A.27: Estaca 2G Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

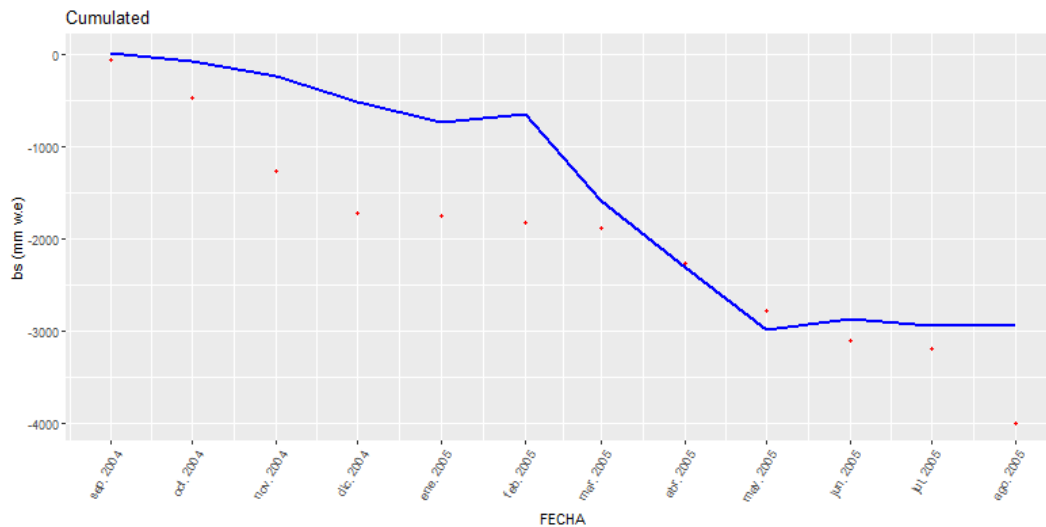


Figura A.28: Estaca 2G Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

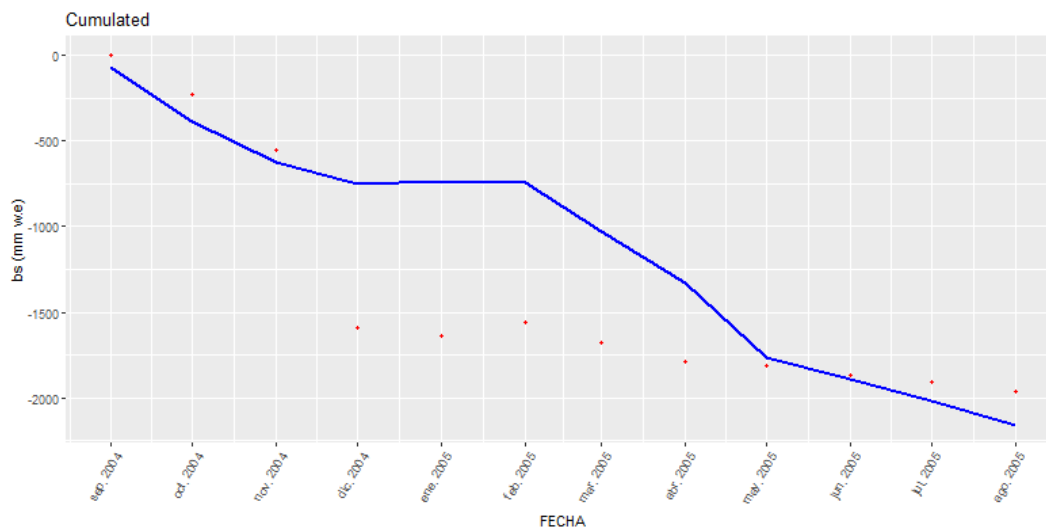


Figura A.29: Estaca X1 Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

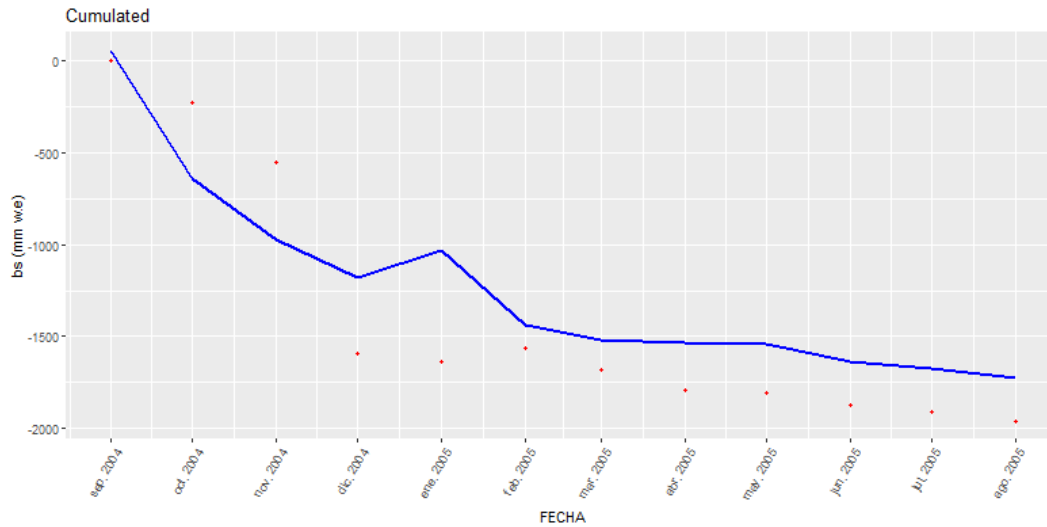


Figura A.30: Estaca X1 Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

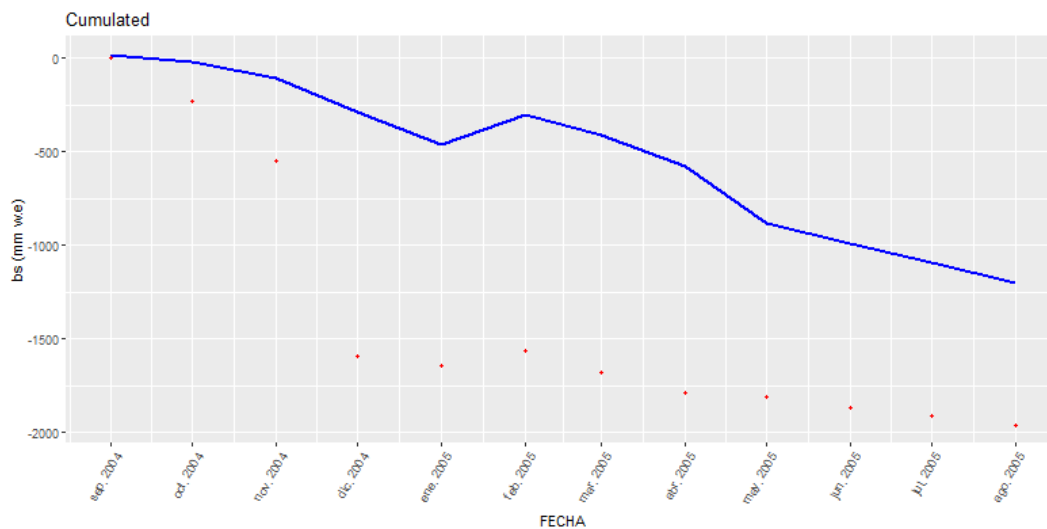


Figura A.31: Estaca X1 Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

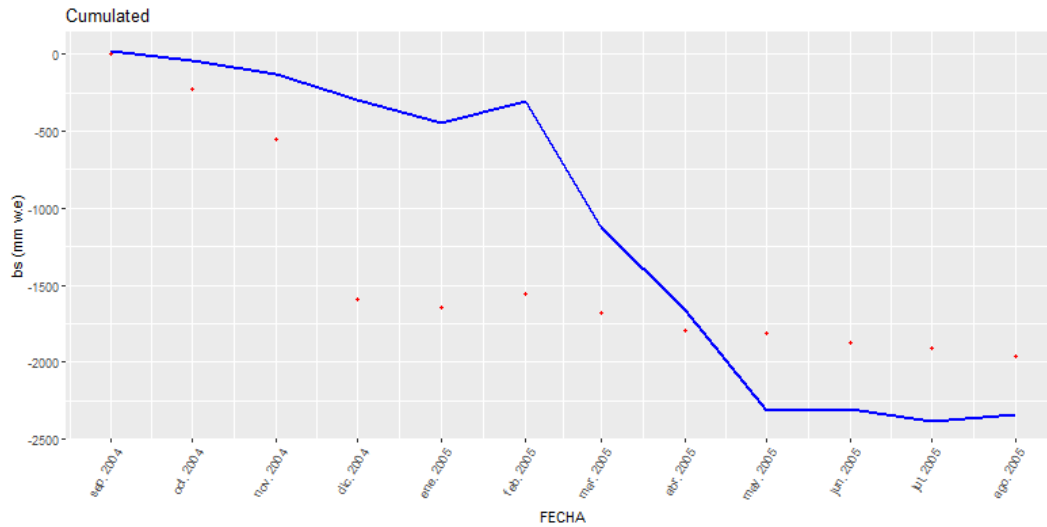


Figura A.32: Estaca X1 Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2004–2005, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

#### A.4.1. Resultados del Modelo de Índice de Temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI para el año 2005-2006

A continuación se muestran las gráficas del Balance de masa del modelo de Índice de Temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo SETI, para dos años hidrológicos 2005–2006.

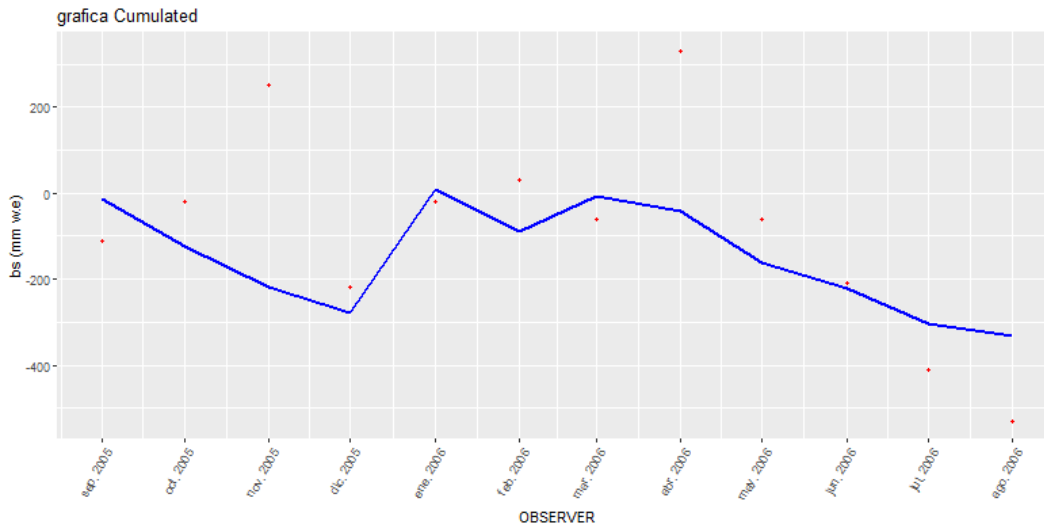


Figura A.33: Estaca 1H Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

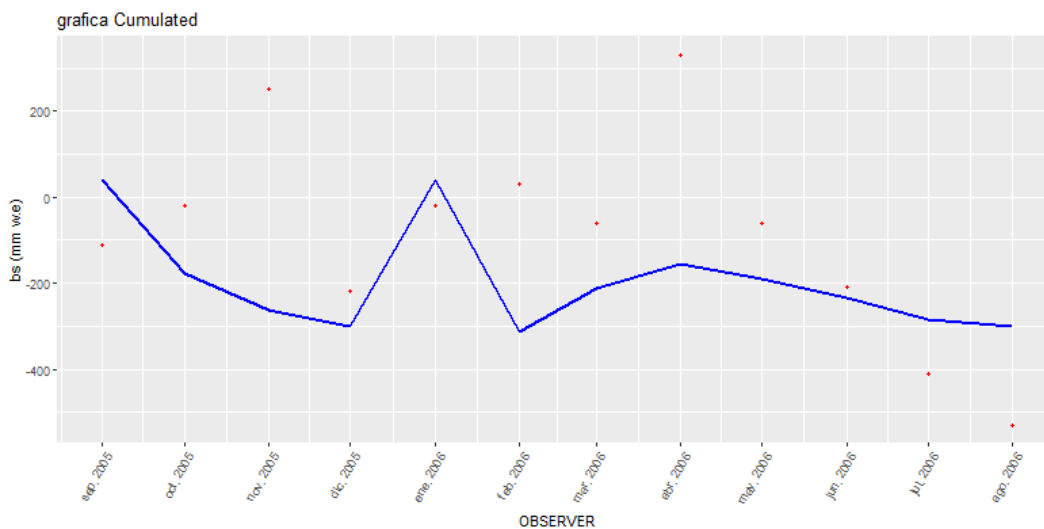


Figura A.34: Estaca 1H Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.



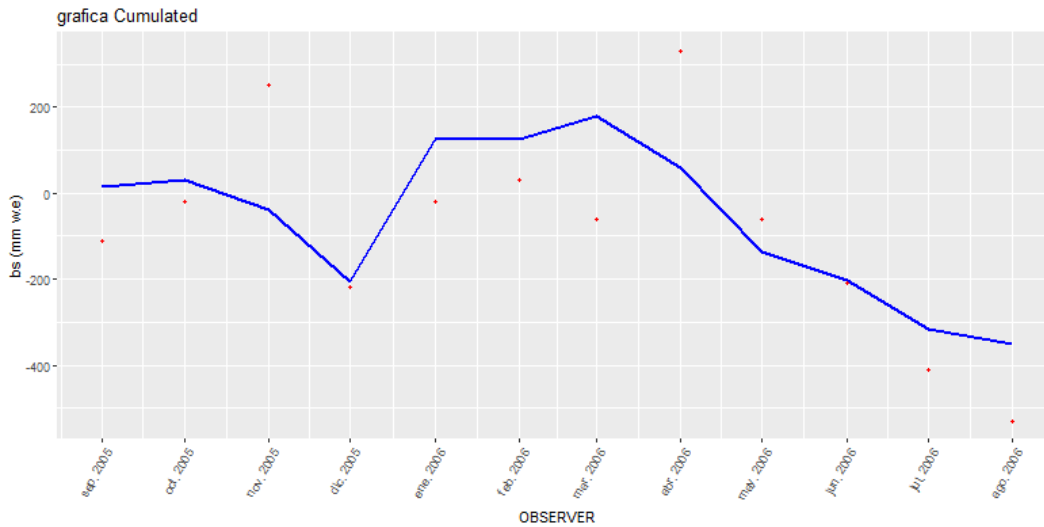


Figura A.35: Estaca 1H Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

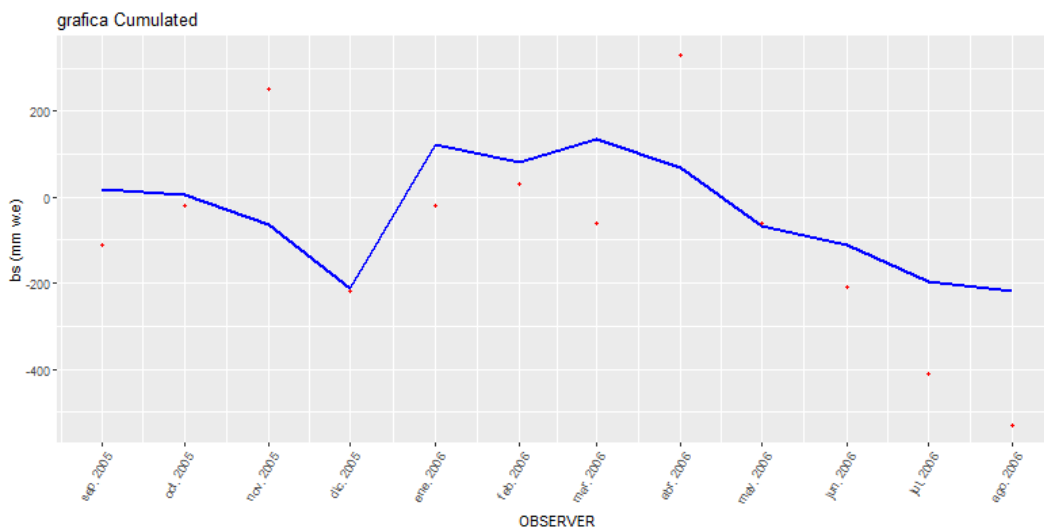


Figura A.36: Estaca 1H Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

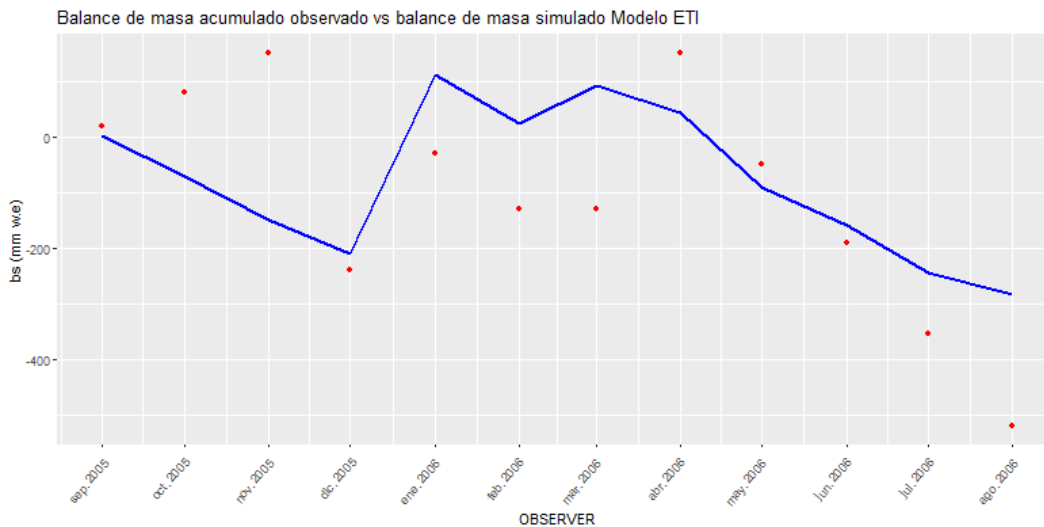


Figura A.37: Estaca 2G Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

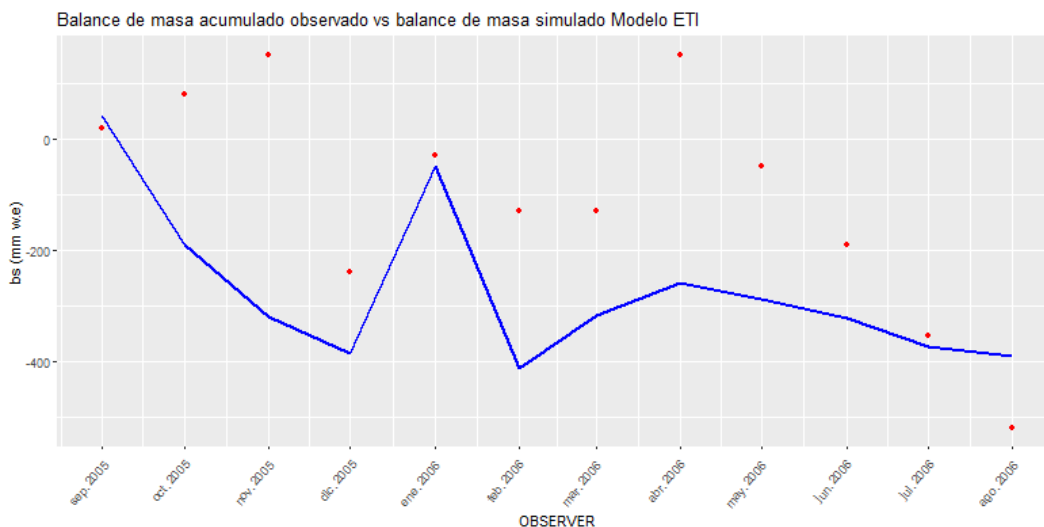


Figura A.38: Estaca 2G Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

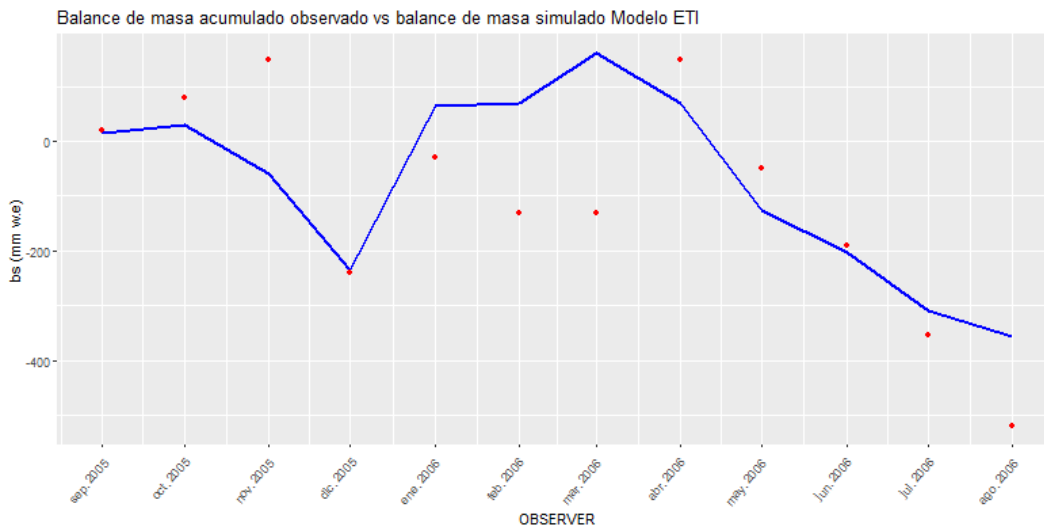


Figura A.39: Estaca 2G Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

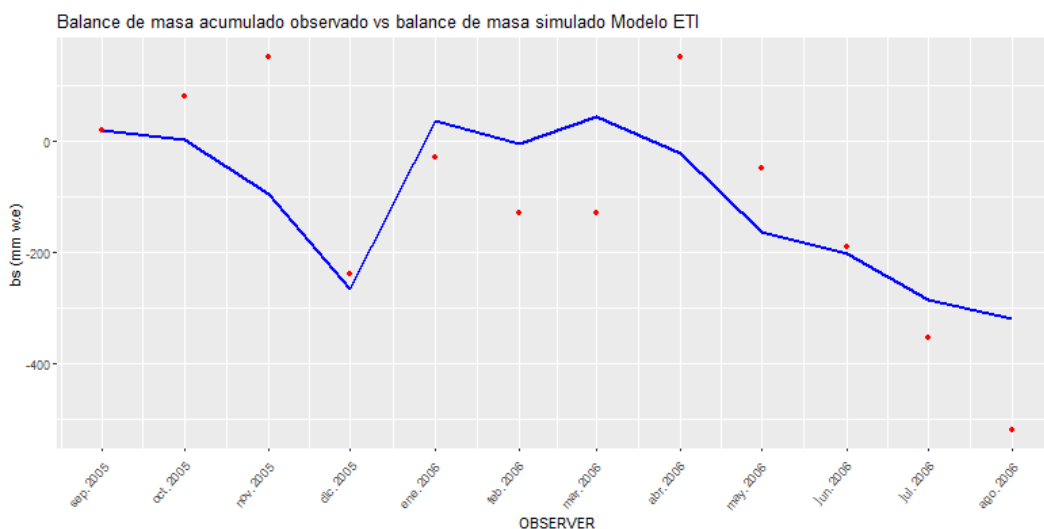


Figura A.40: Estaca 2G Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

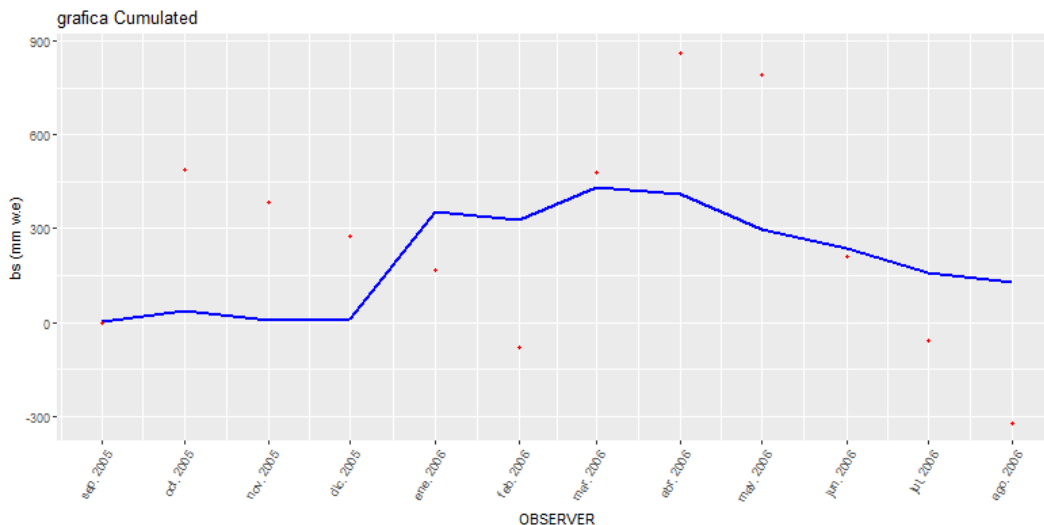


Figura A.41: Estaca 1K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

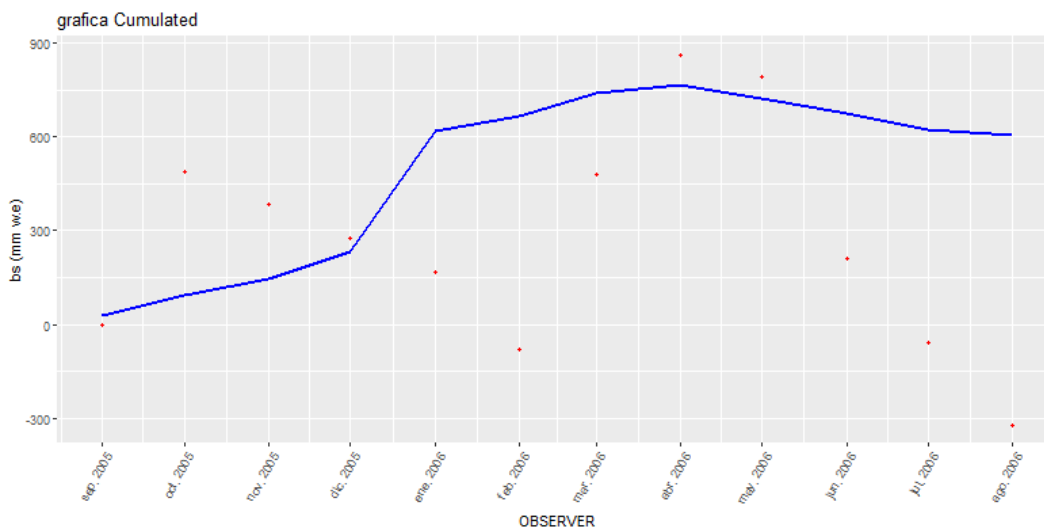


Figura A.42: Estaca 1K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

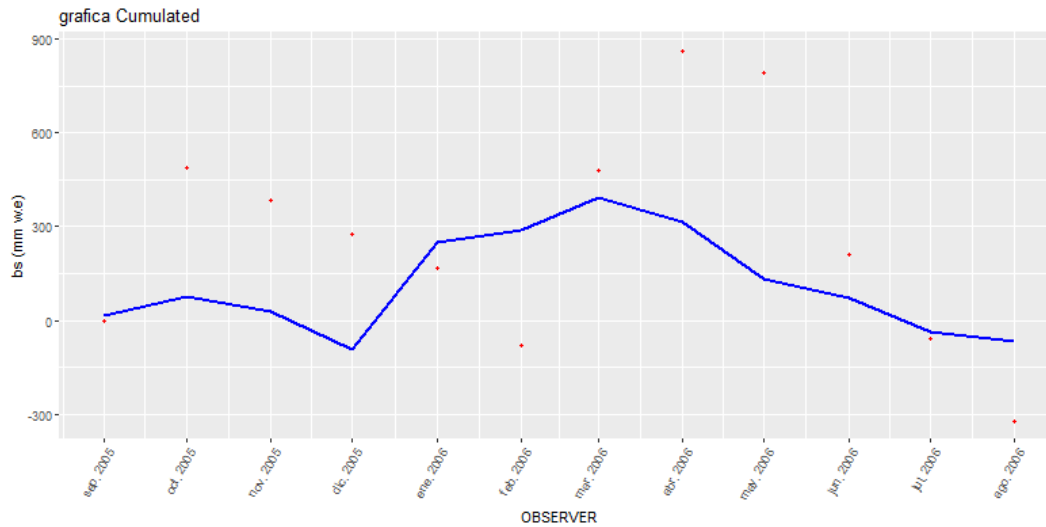


Figura A.43: Estaca 1K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

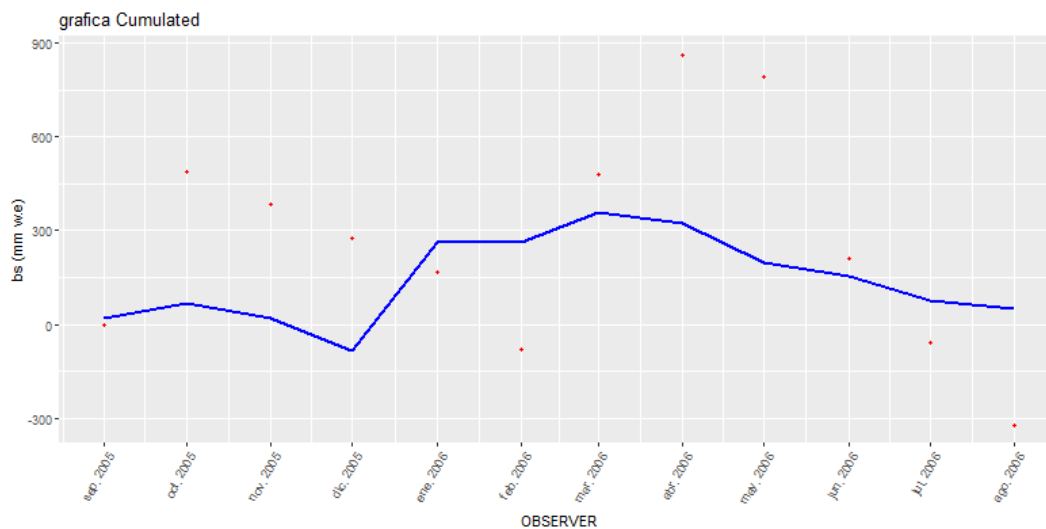


Figura A.44: Estaca 1K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

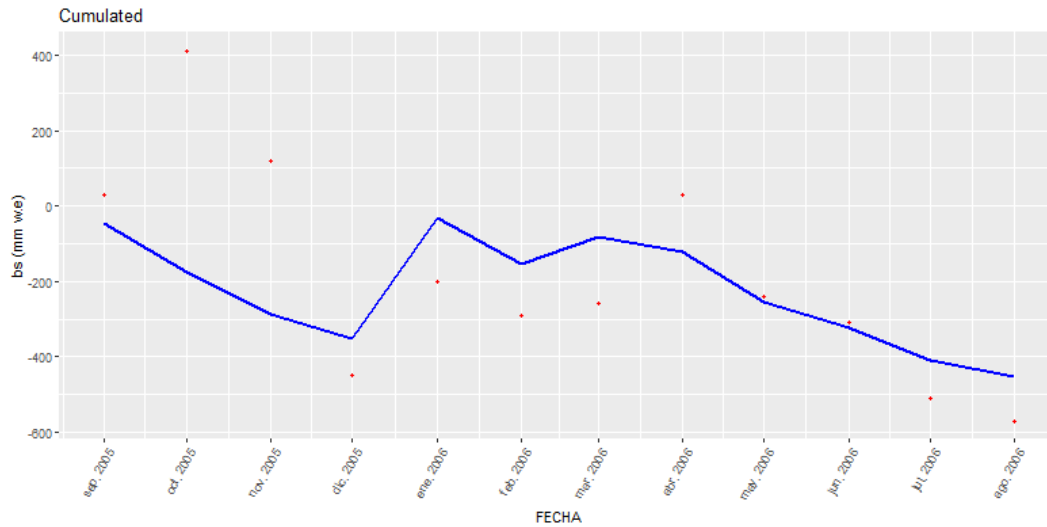


Figura A.45: Estaca 6K Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

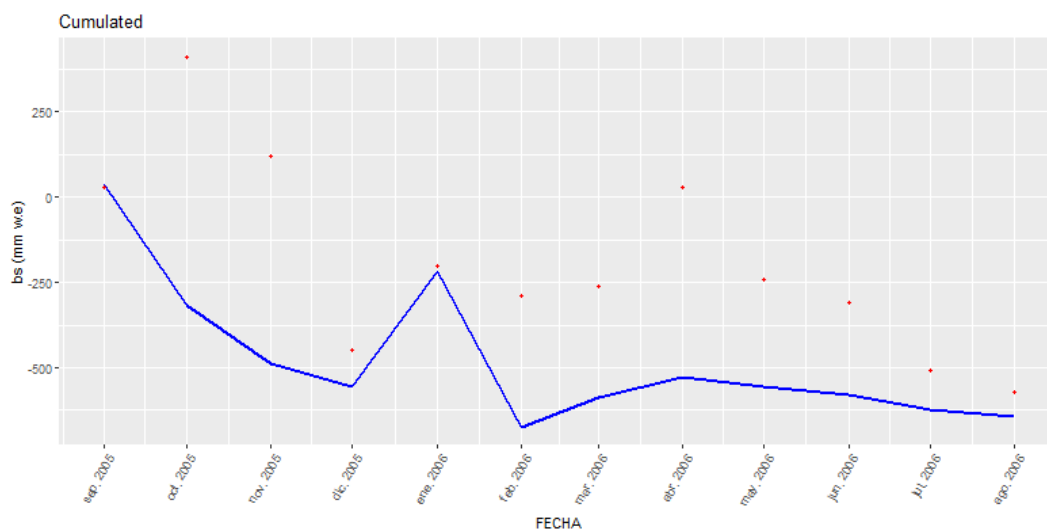


Figura A.46: Estaca 6K Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

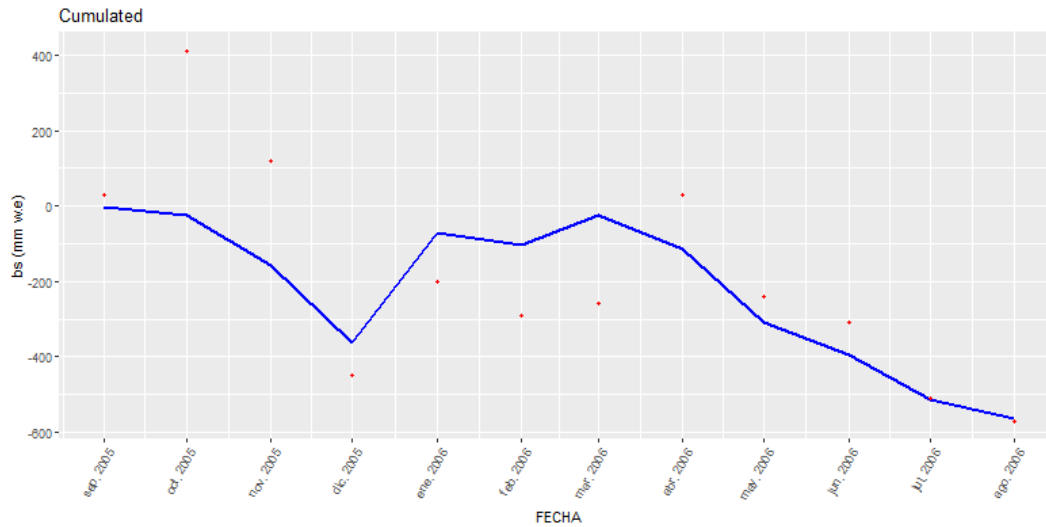


Figura A.47: Estaca 6K Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

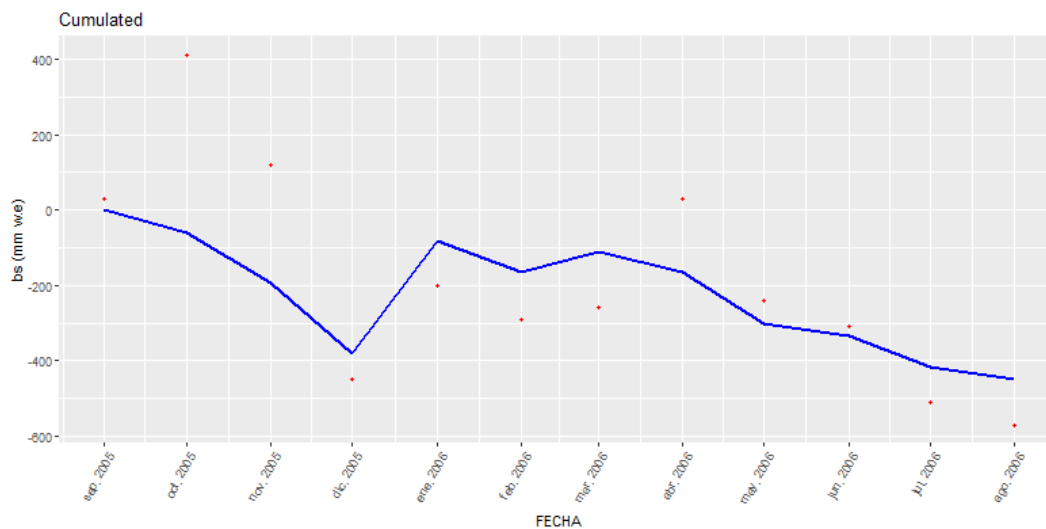


Figura A.48: Estaca 6K Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

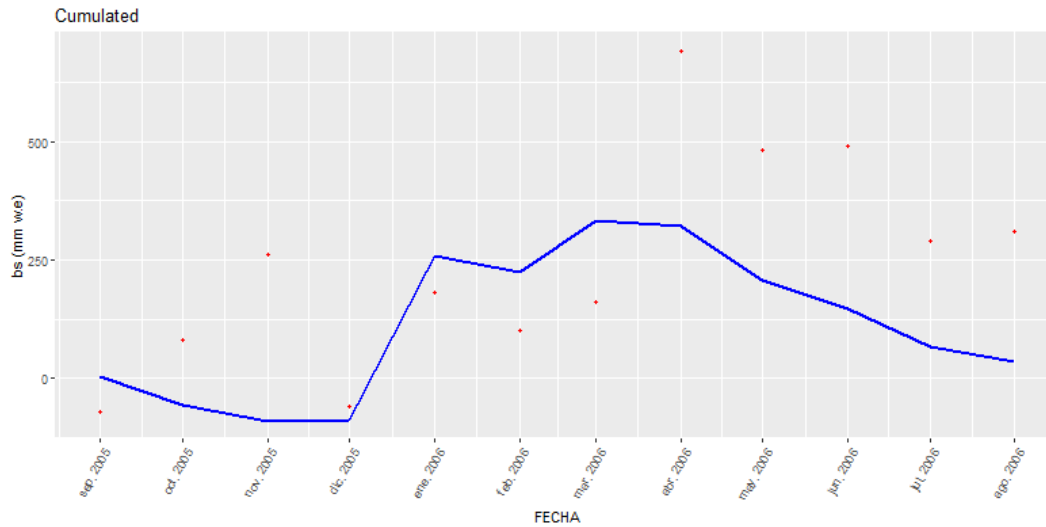


Figura A.49: Estaca 1N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (linea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

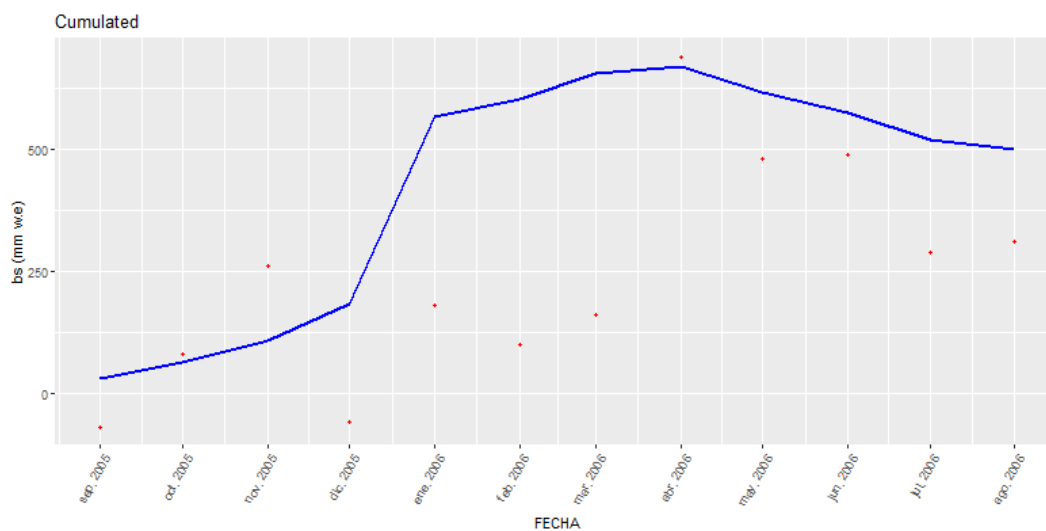


Figura A.50: Estaca 1N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (linea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.



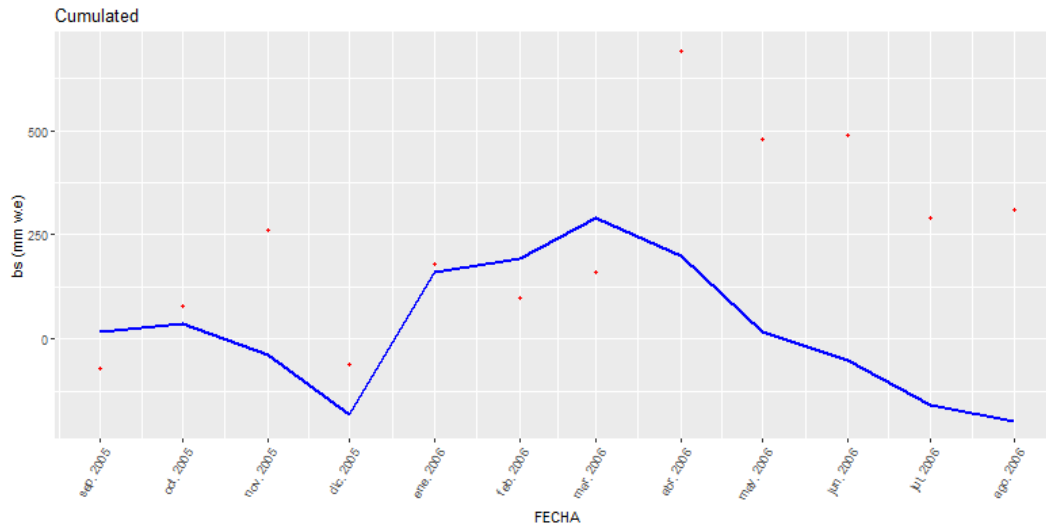


Figura A.51: Estaca 1N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

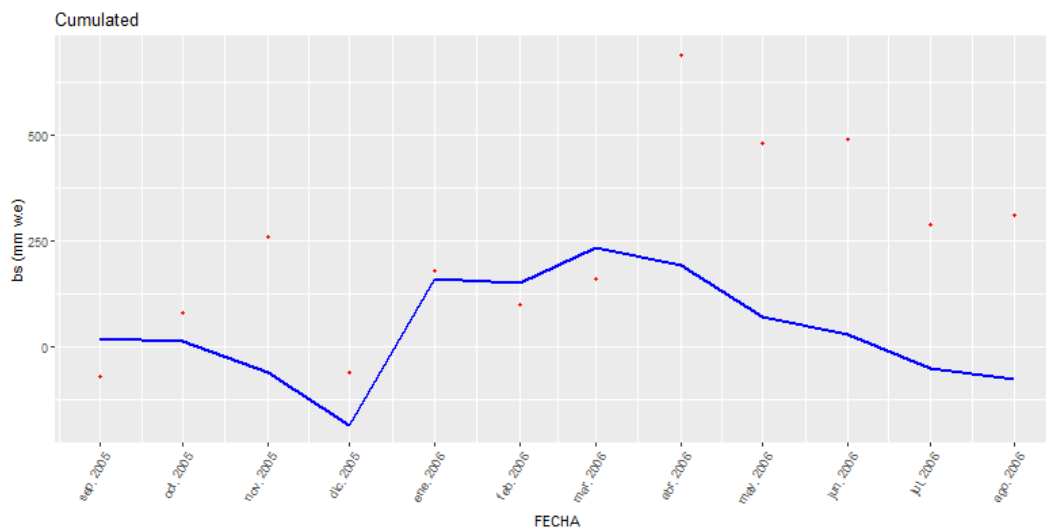


Figura A.52: Estaca 1N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

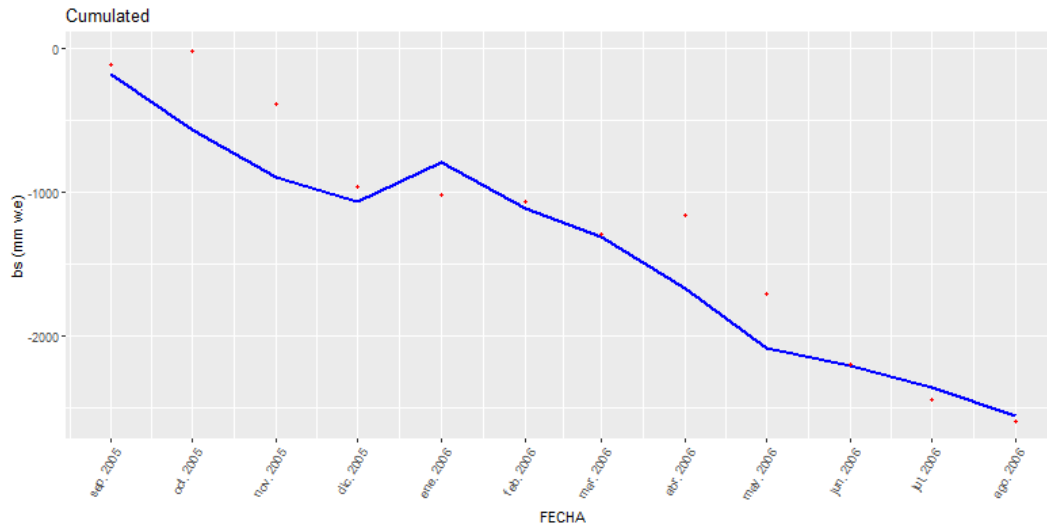


Figura A.53: Estaca 7N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

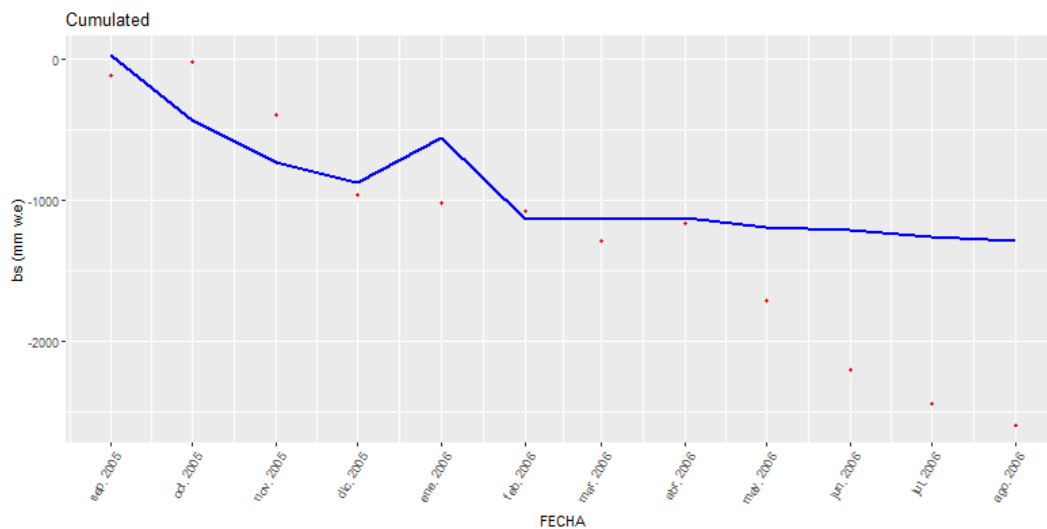


Figura A.54: Estaca 7N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

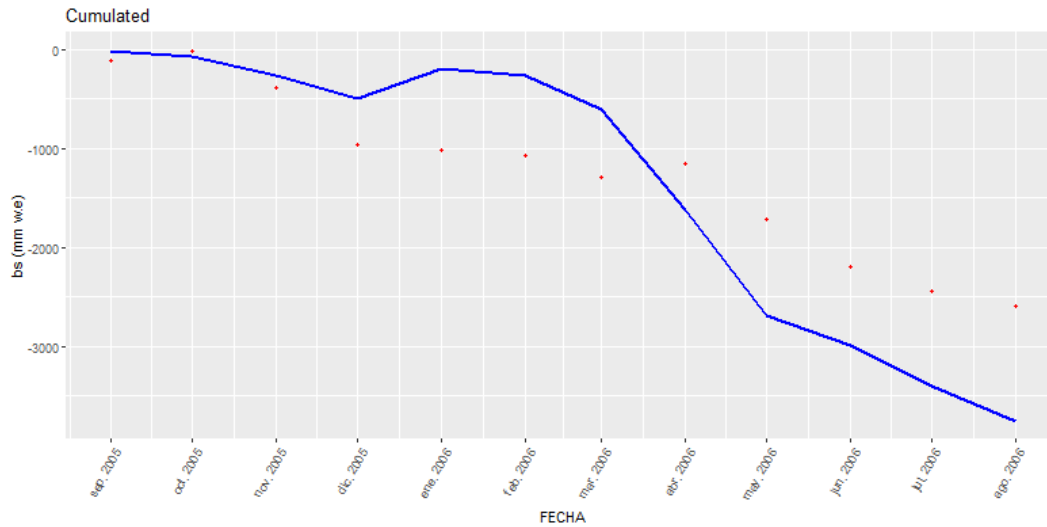


Figura A.55: Estaca 7N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

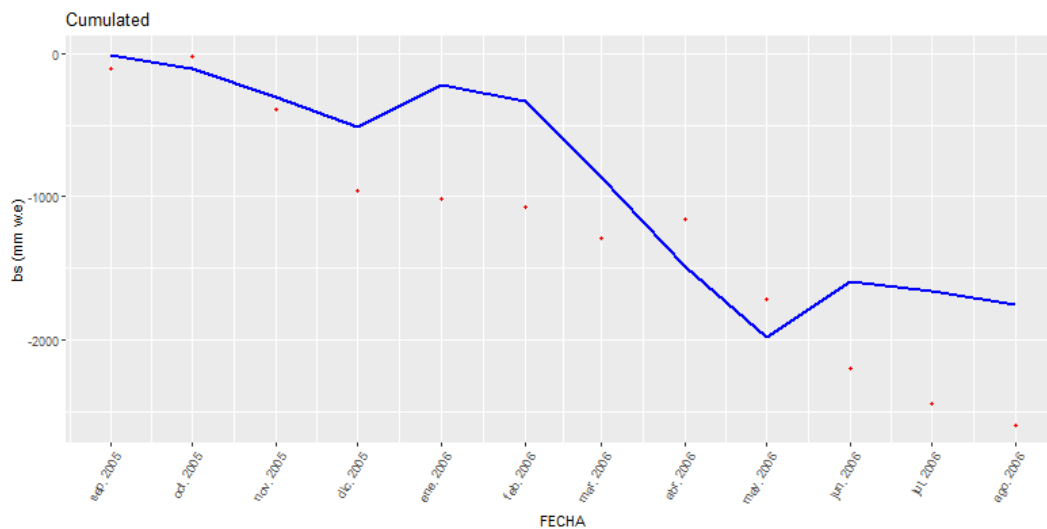


Figura A.56: Estaca 7N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

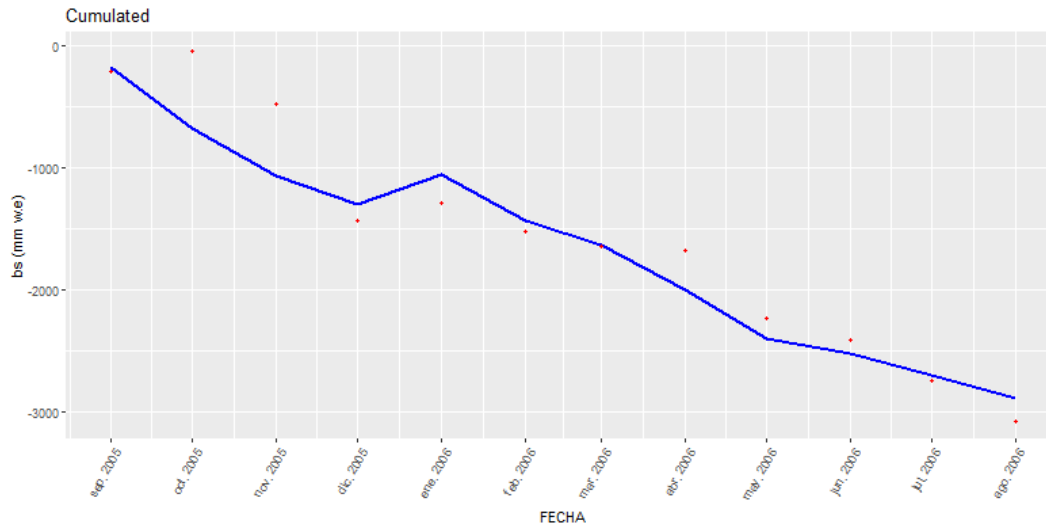


Figura A.57: Estaca 8N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

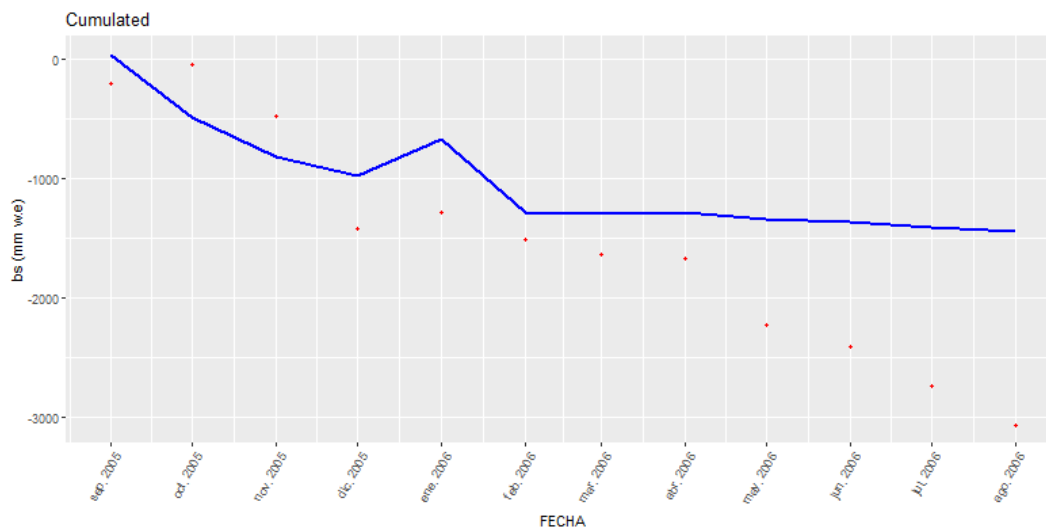


Figura A.58: Estaca 8N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

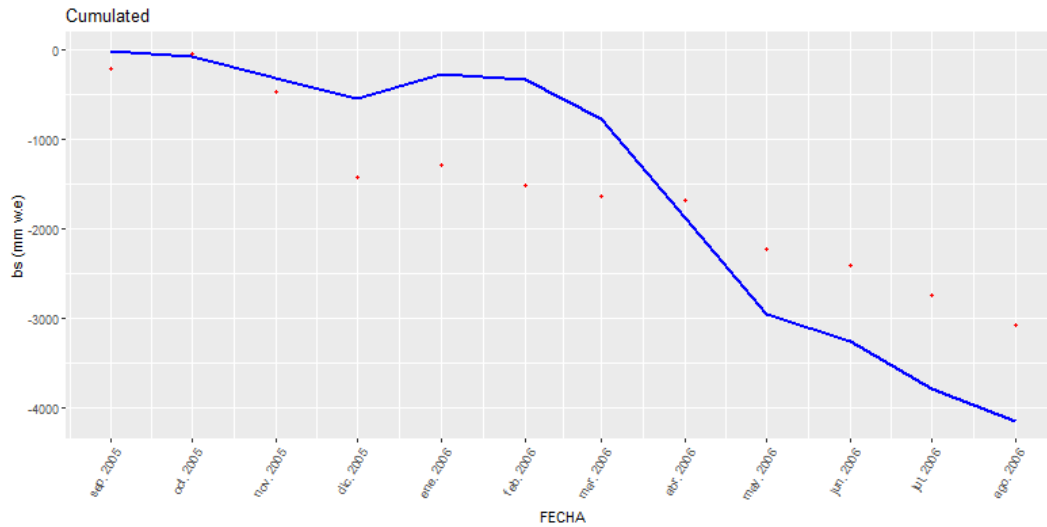


Figura A.59: Estaca 8N Sombras Projectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

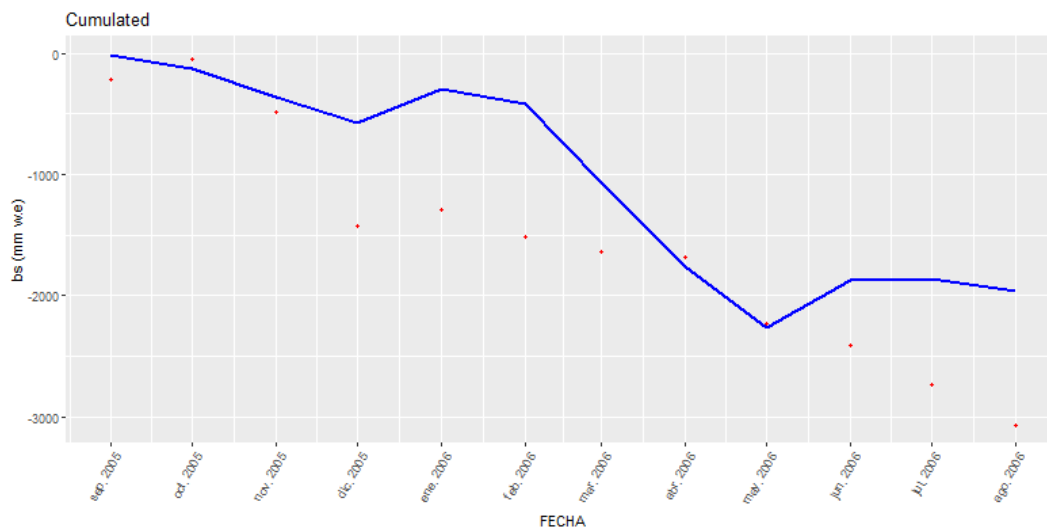


Figura A.60: Estaca 8N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

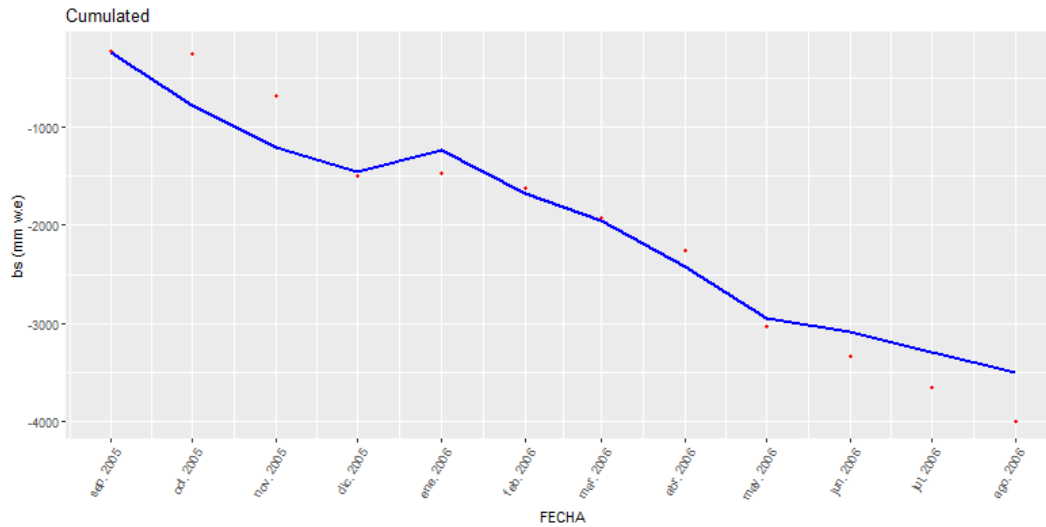


Figura A.61: Estaca 9N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

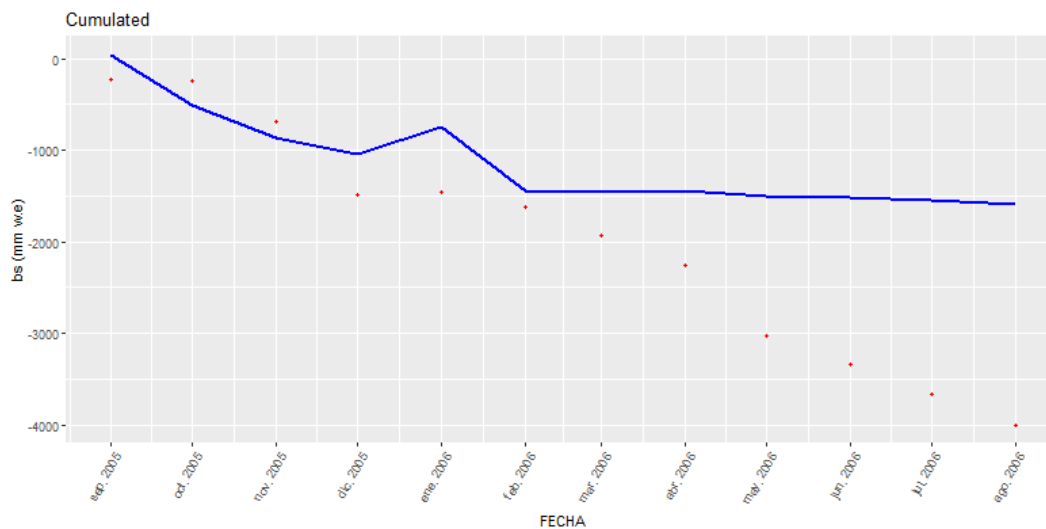


Figura A.62: Estaca 9N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

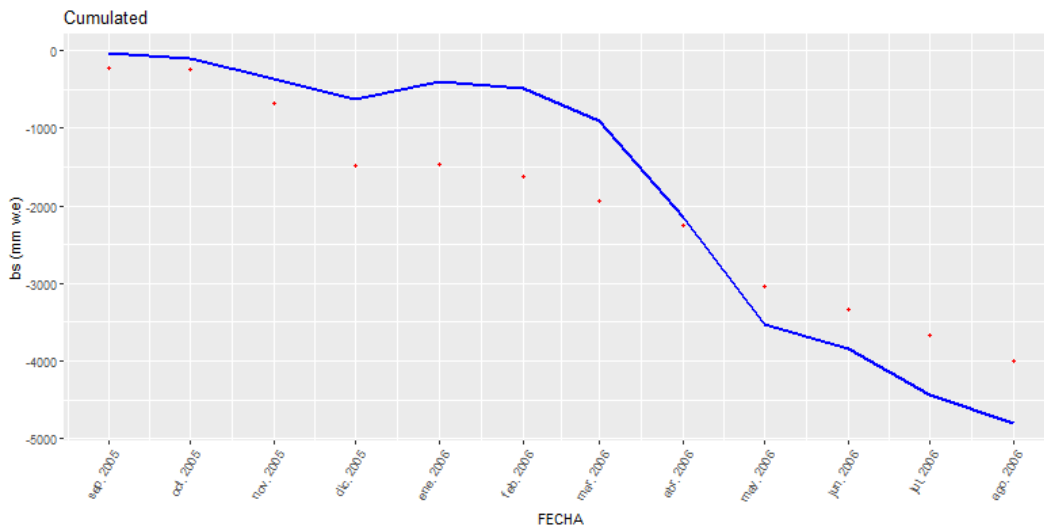


Figura A.63: Estaca 9N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

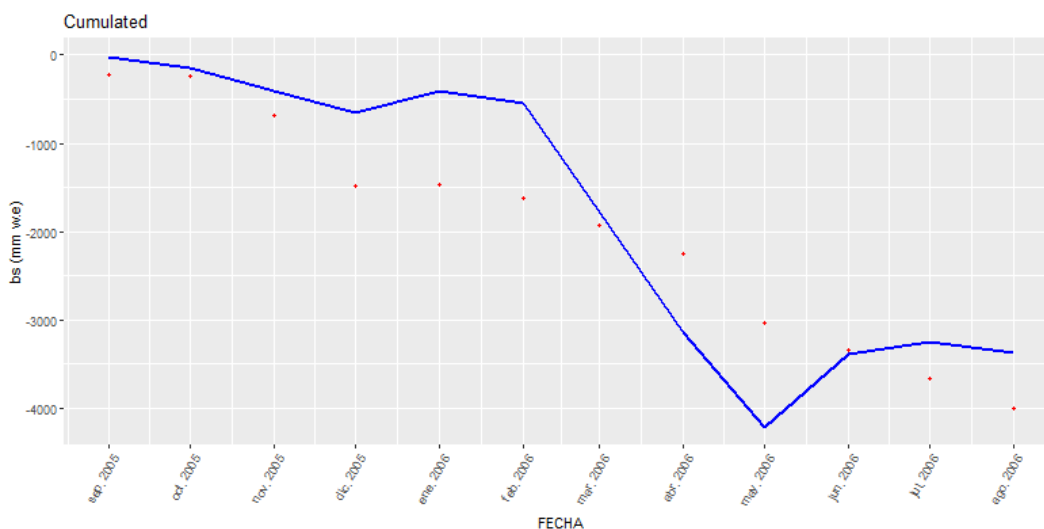


Figura A.64: Estaca 9N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

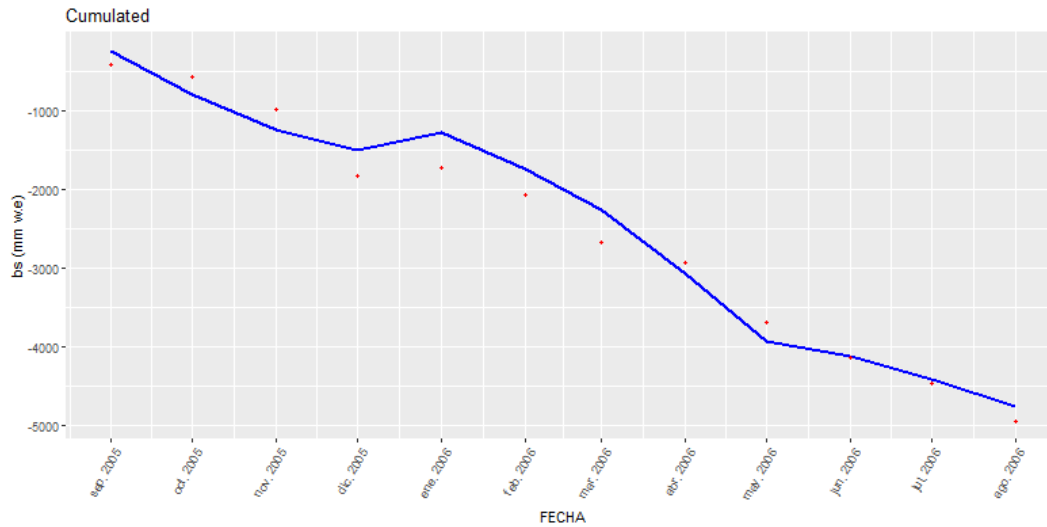


Figura A.65: Estaca 10N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

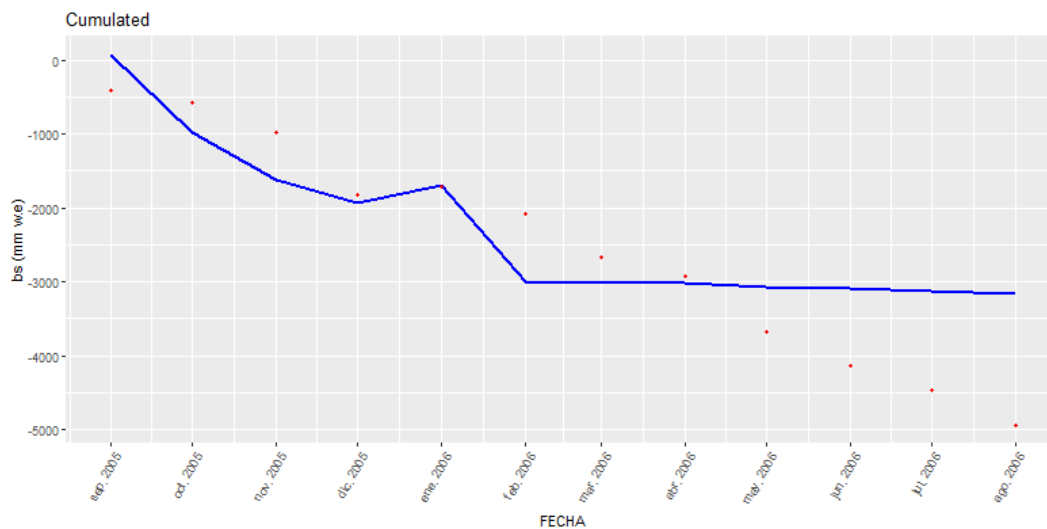


Figura A.66: Estaca 10N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.



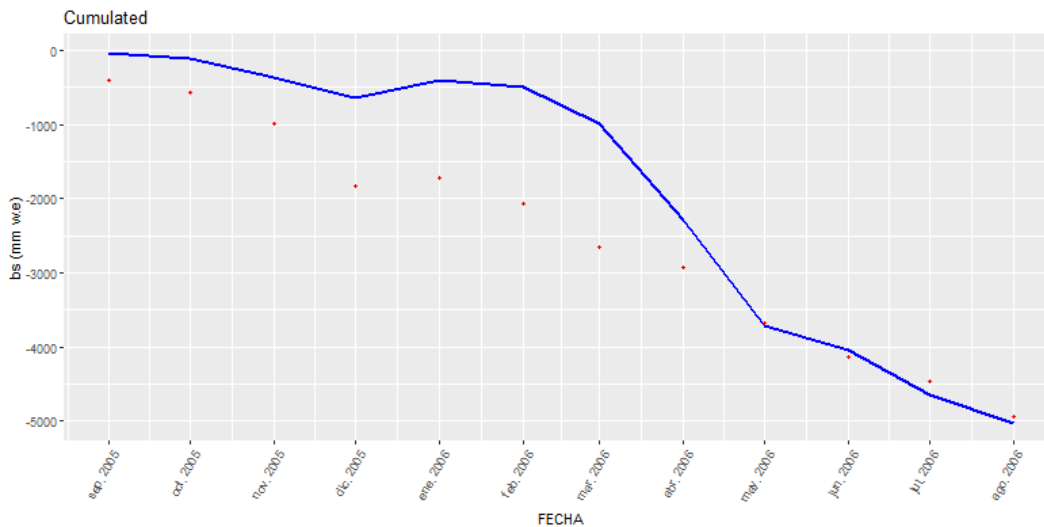


Figura A.67: Estaca 10N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

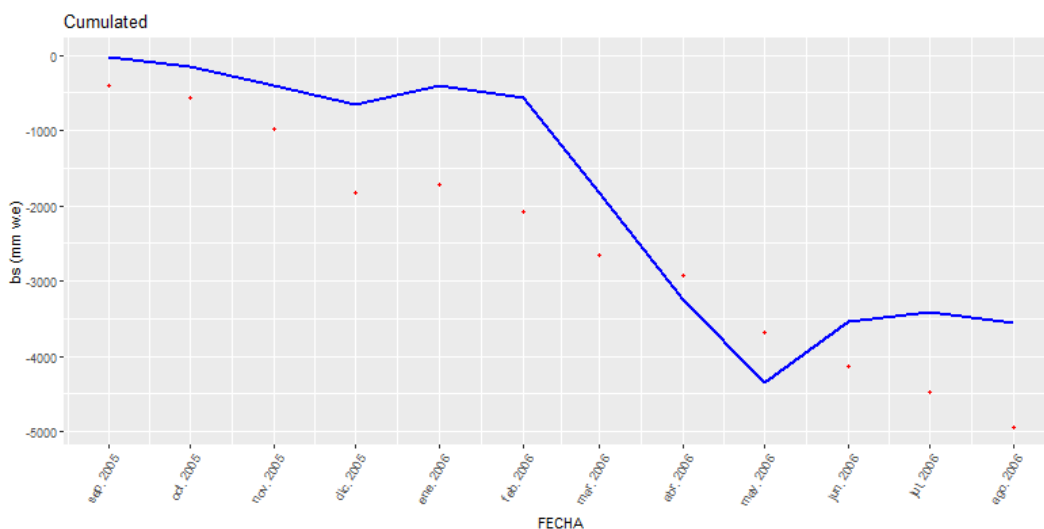


Figura A.68: Estaca 10N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

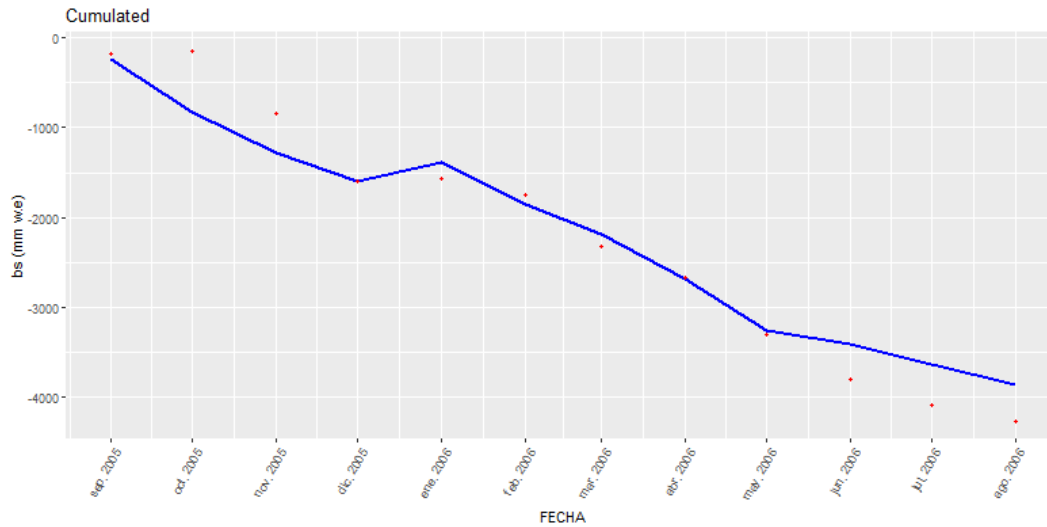


Figura A.69: Estaca 11N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

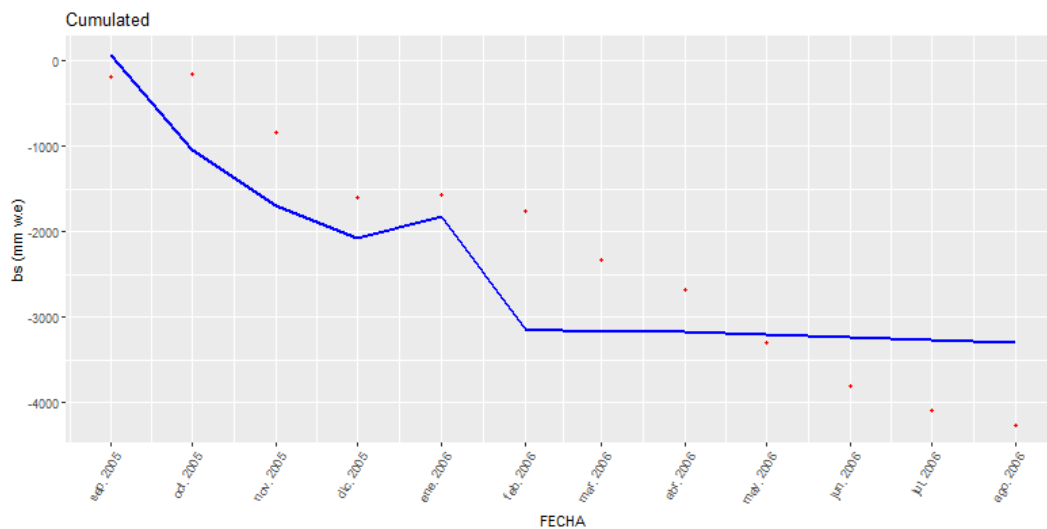


Figura A.70: Estaca 11N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

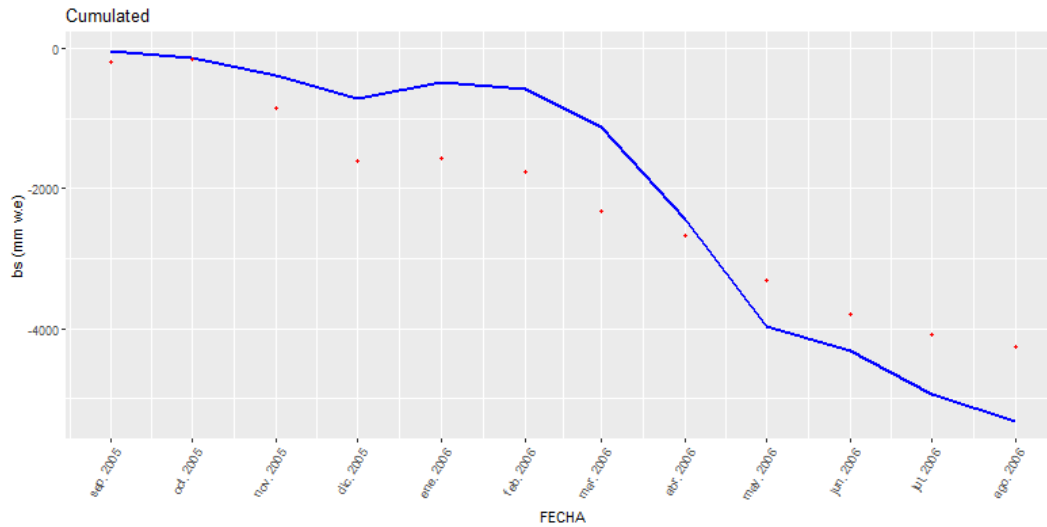


Figura A.71: Estaca 11N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

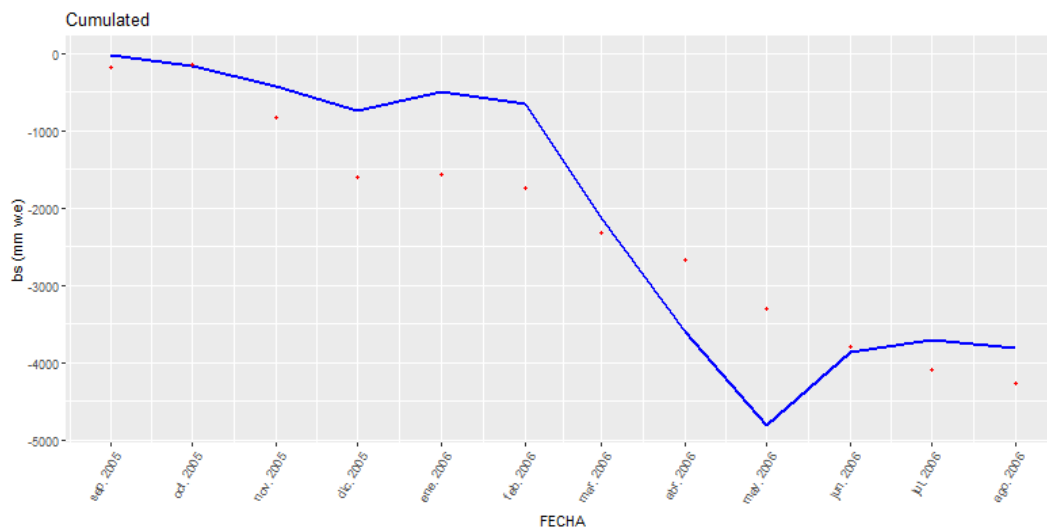


Figura A.72: Estaca 11N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

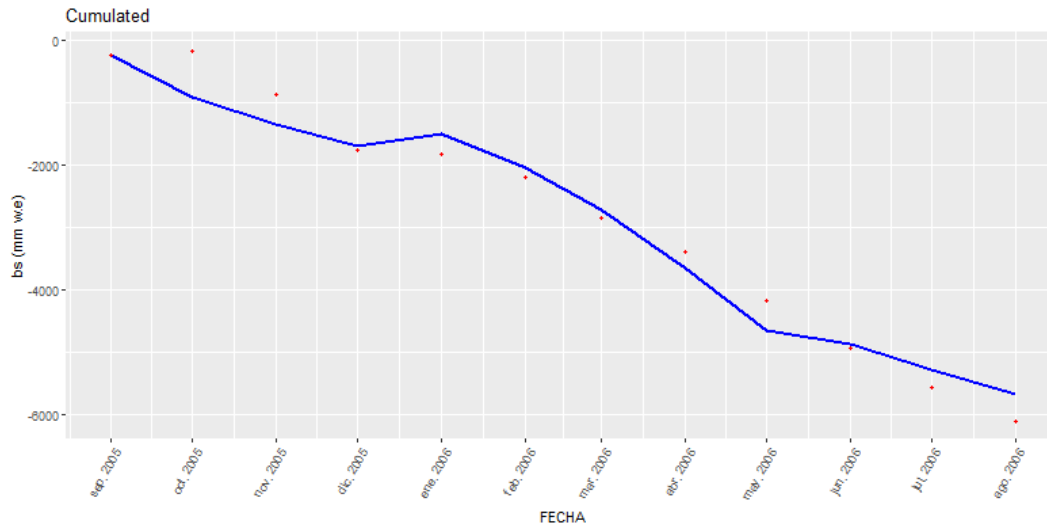


Figura A.73: Estaca 12N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

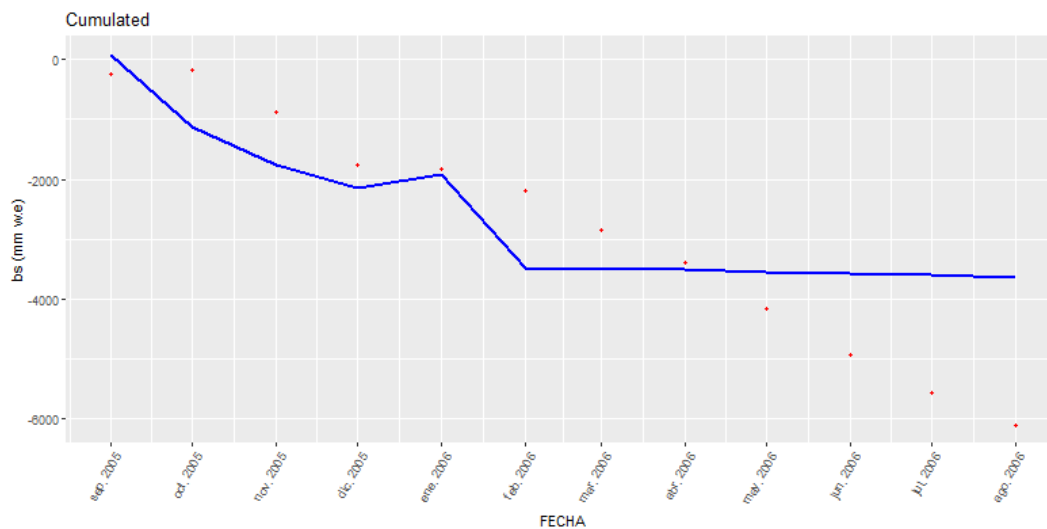


Figura A.74: Estaca 12N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

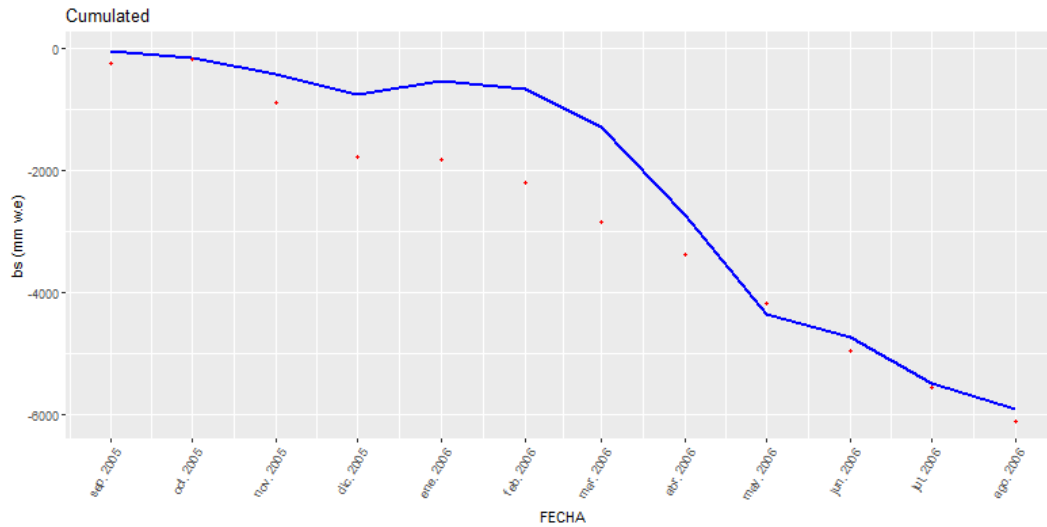


Figura A.75: Estaca 12N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

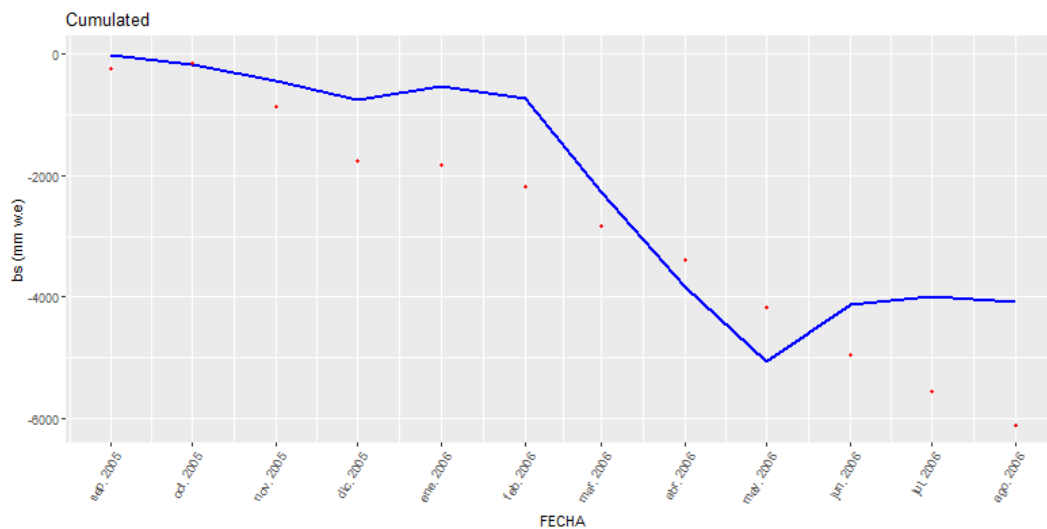


Figura A.76: Estaca 12N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

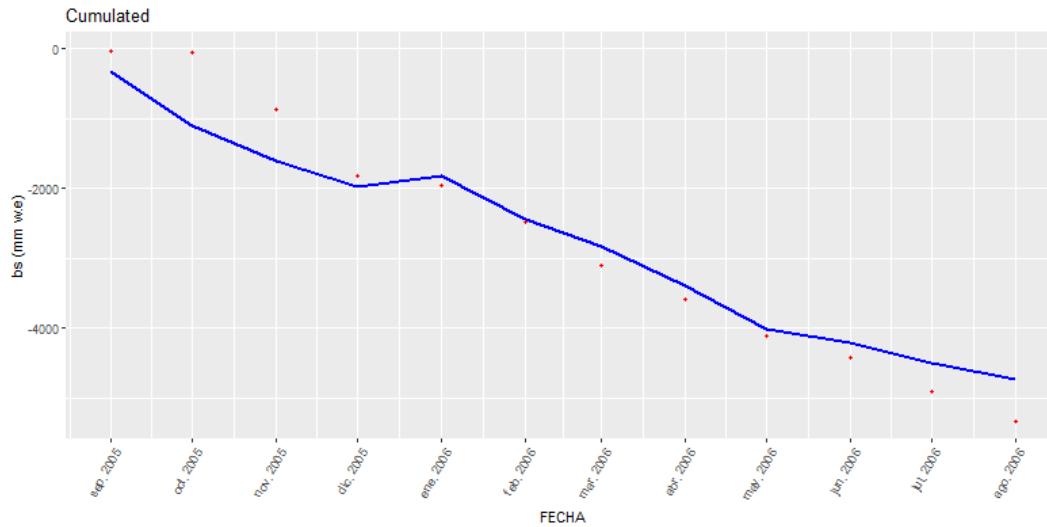


Figura A.77: Estaca 13N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

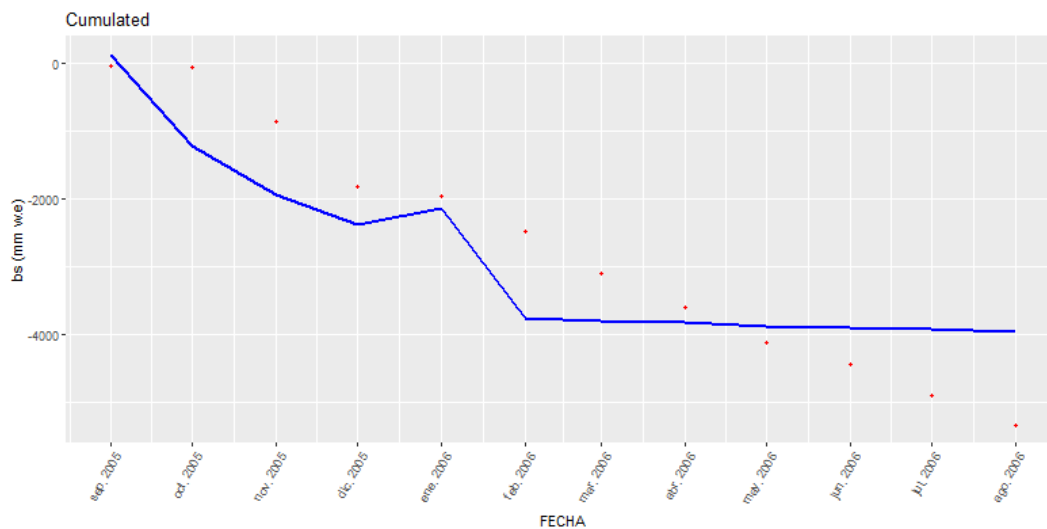


Figura A.78: Estaca 13N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

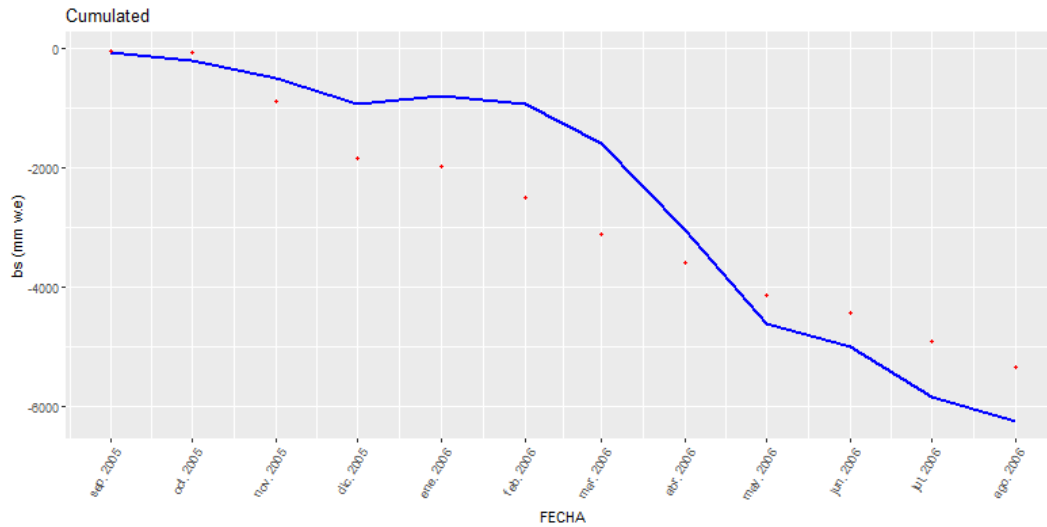


Figura A.79: Estaca 13N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

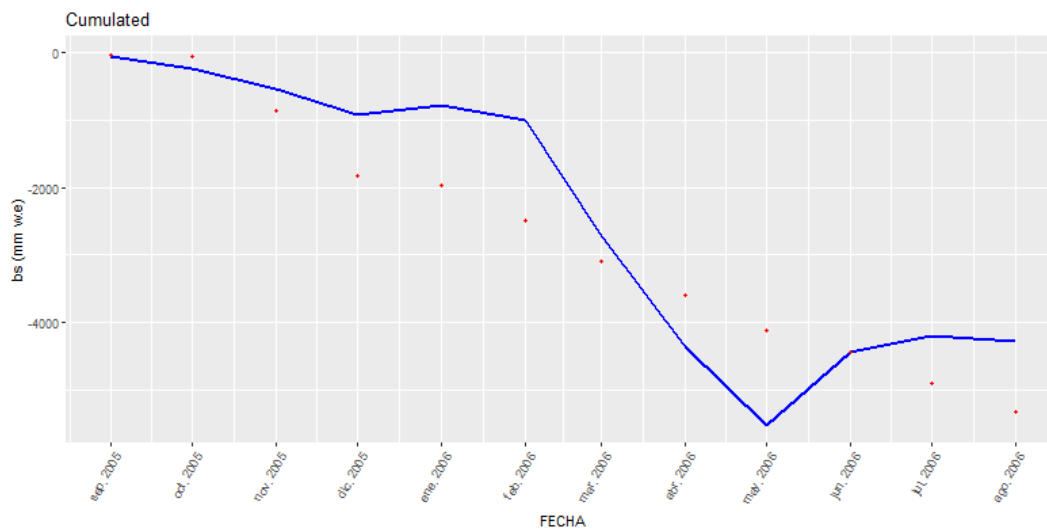


Figura A.80: Estaca 13N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

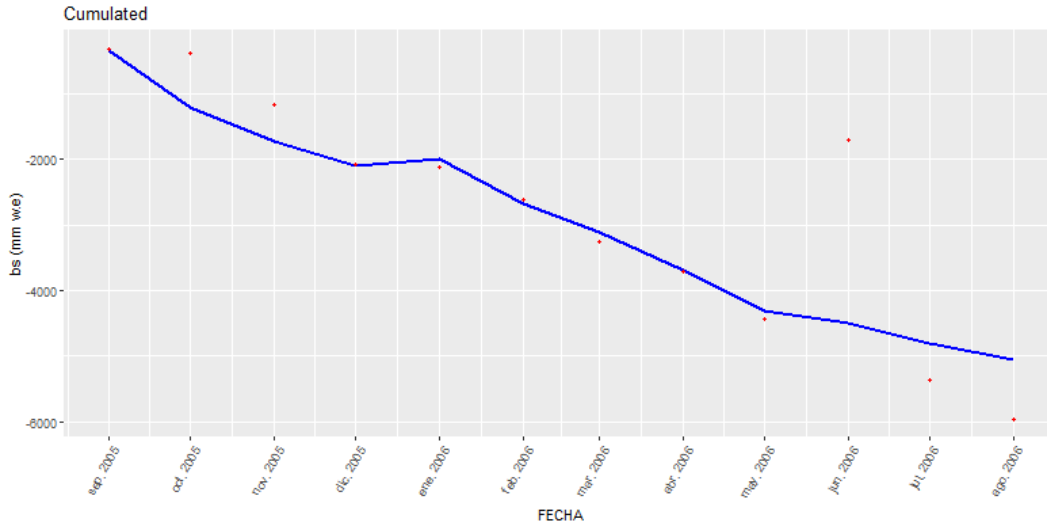


Figura A.81: Estaca 14N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

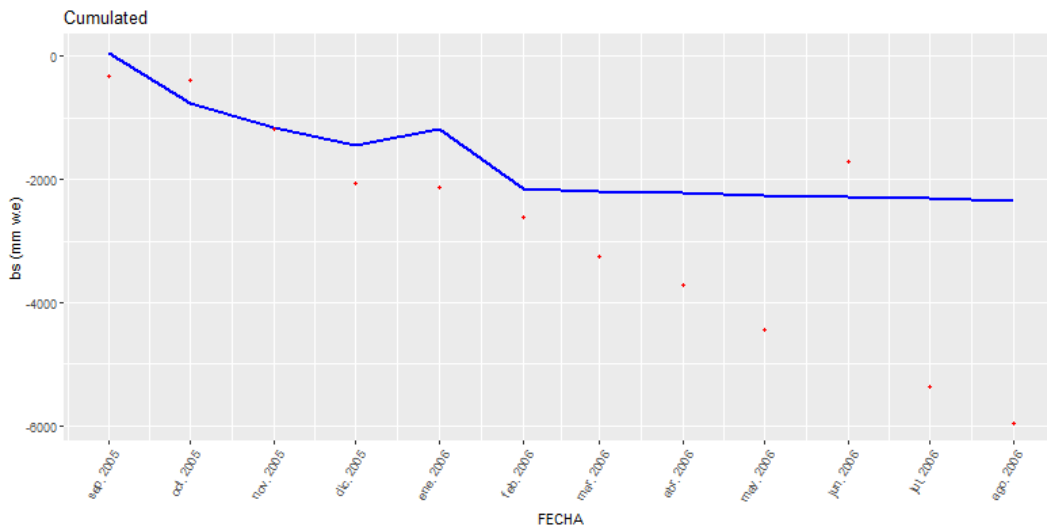


Figura A.82: Estaca 14N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.



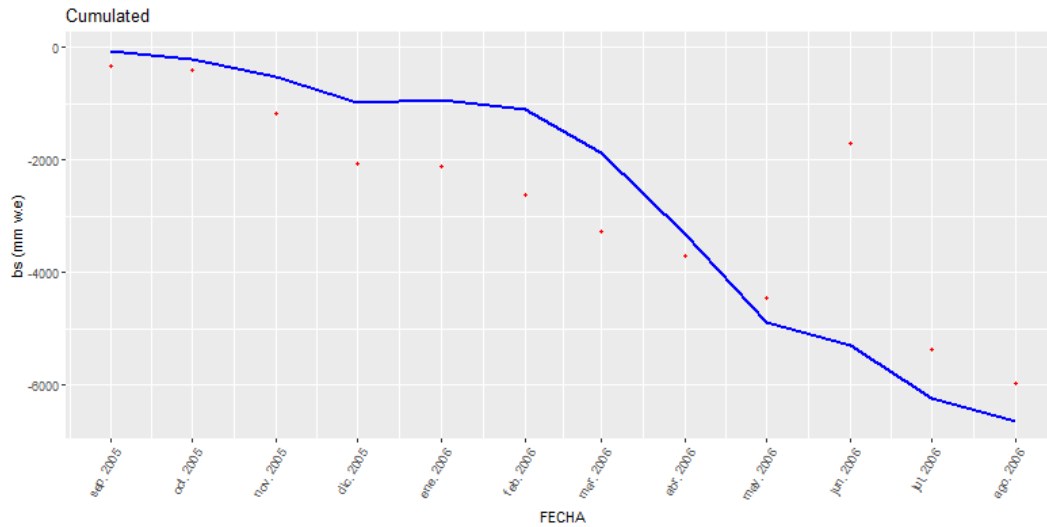


Figura A.83: Estaca 14N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

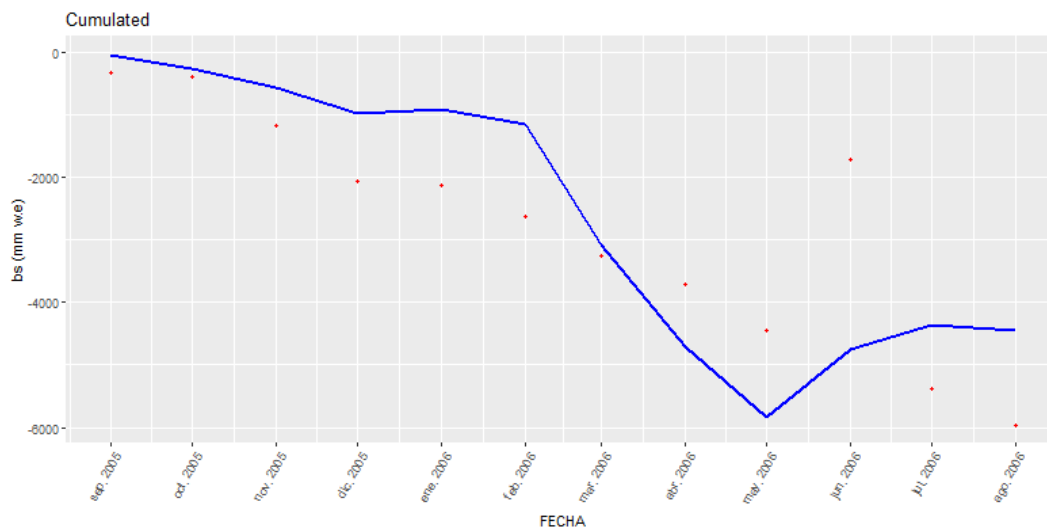


Figura A.84: Estaca 14N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

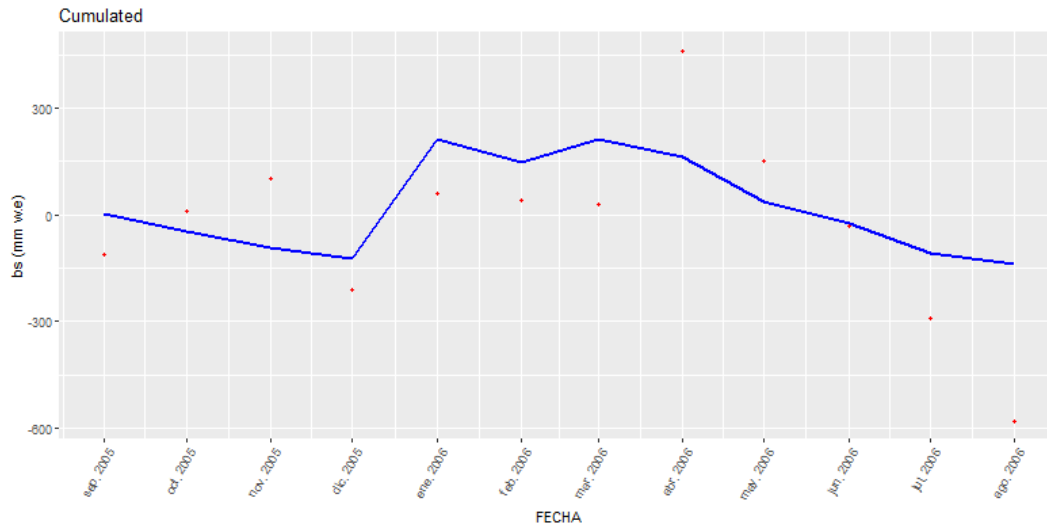


Figura A.85: Estaca 16N Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

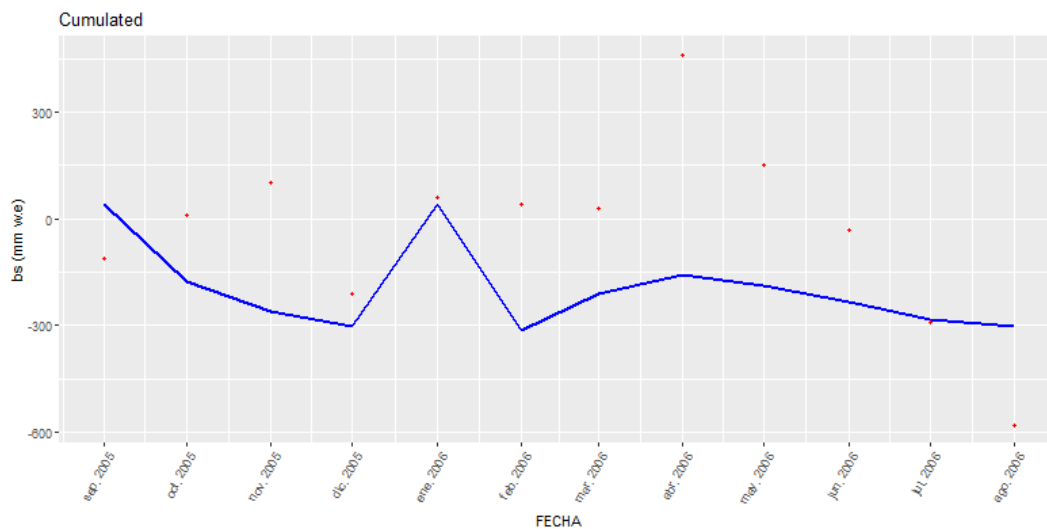


Figura A.86: Estaca 16N Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

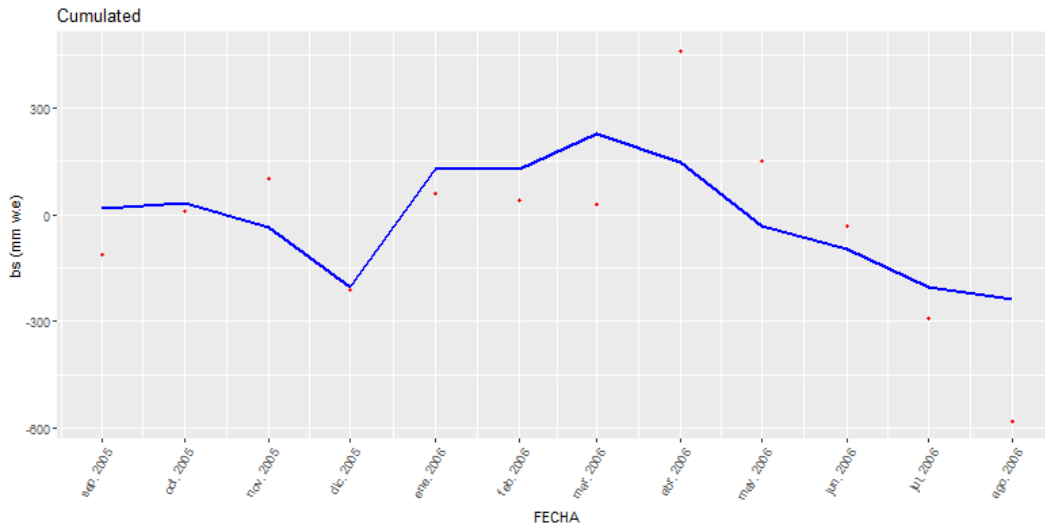


Figura A.87: Estaca 16N Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

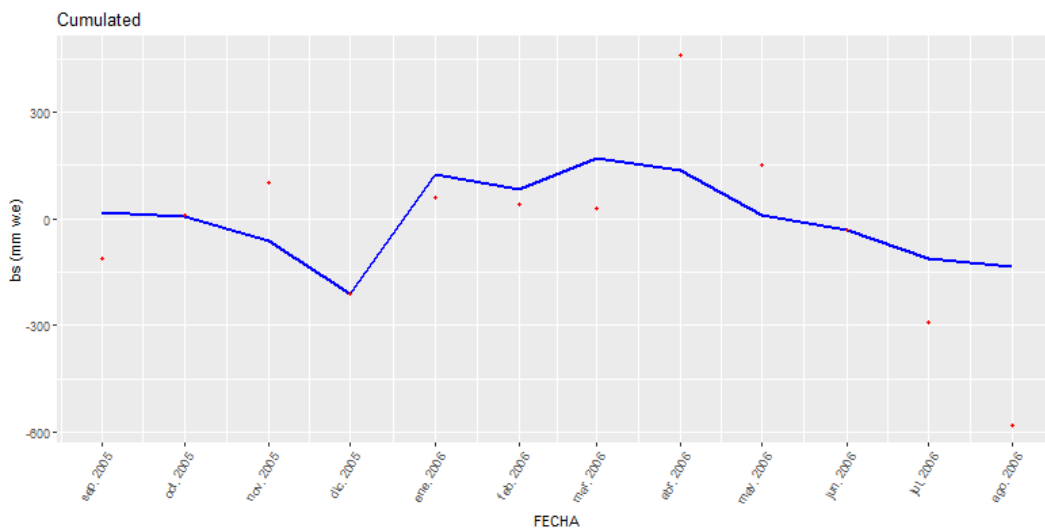


Figura A.88: Estaca 16N Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

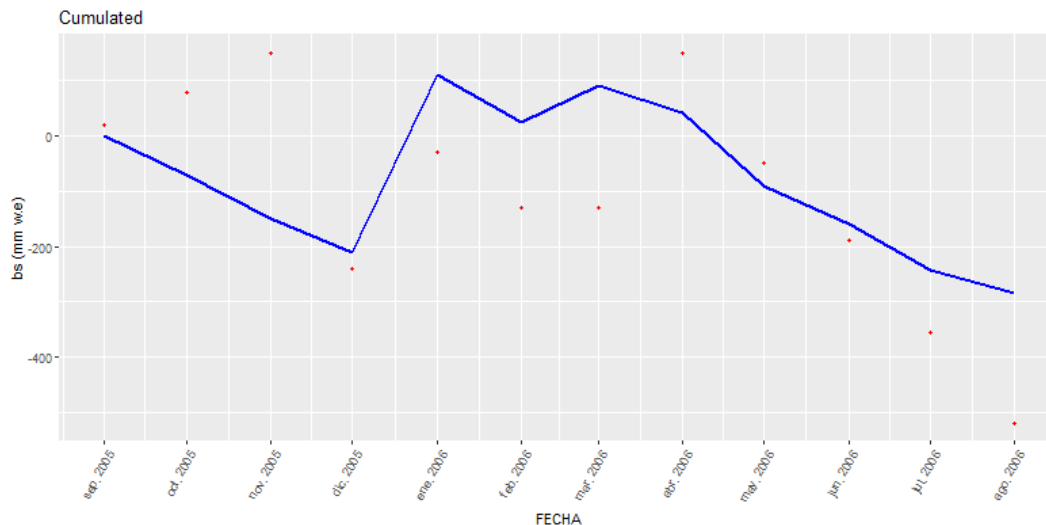


Figura A.89: Estaca 2G Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

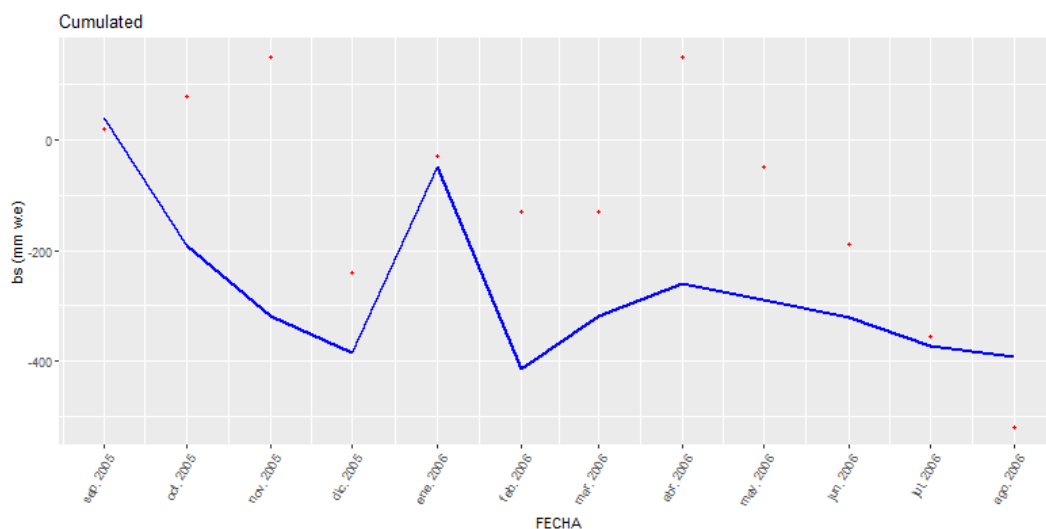


Figura A.90: Estaca 2G Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

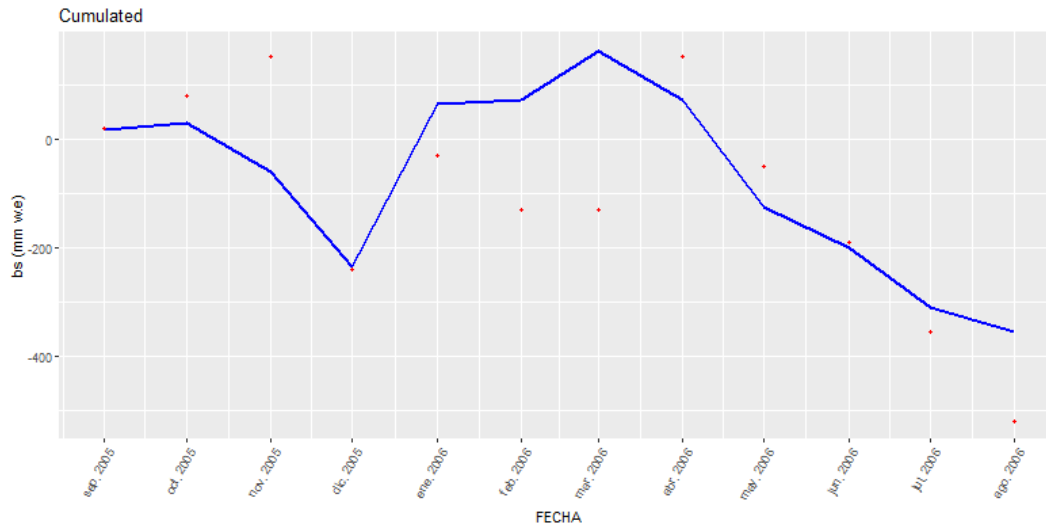


Figura A.91: Estaca 2G Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

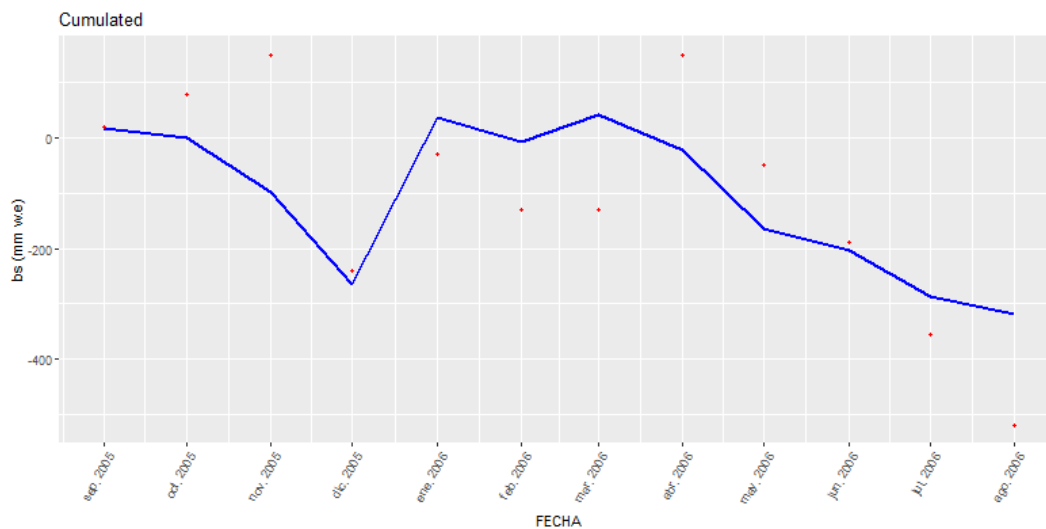


Figura A.92: Estaca 2G Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

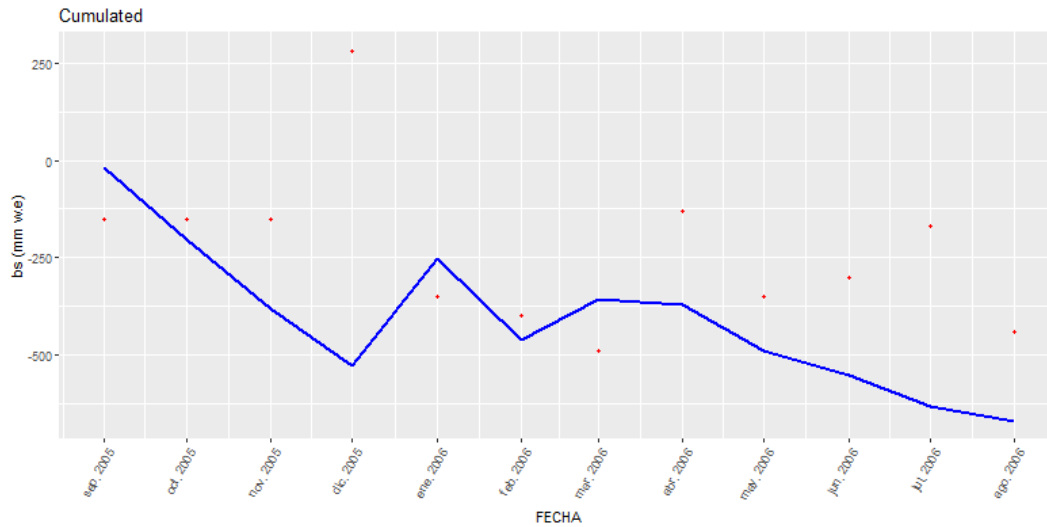


Figura A.93: Estaca 2E Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

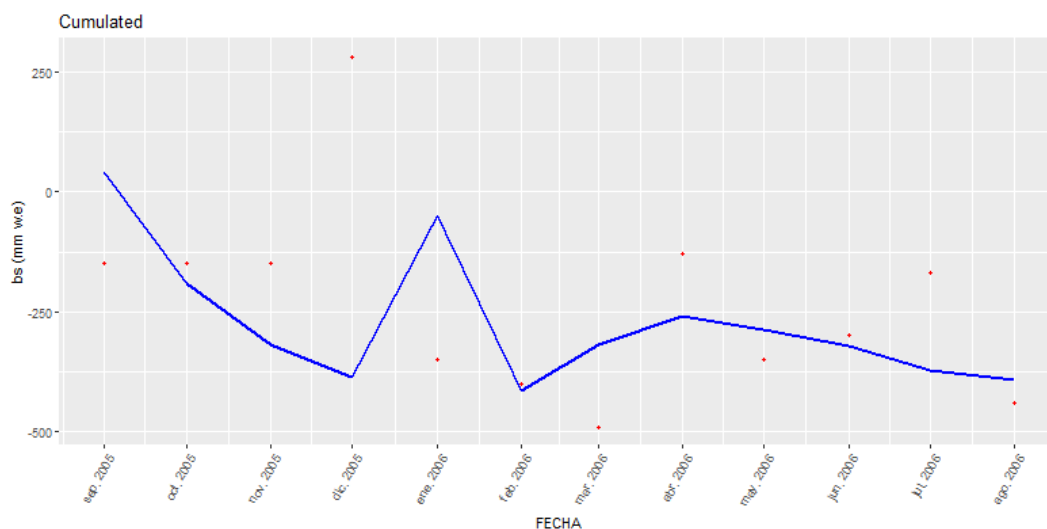


Figura A.94: Estaca 2E Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

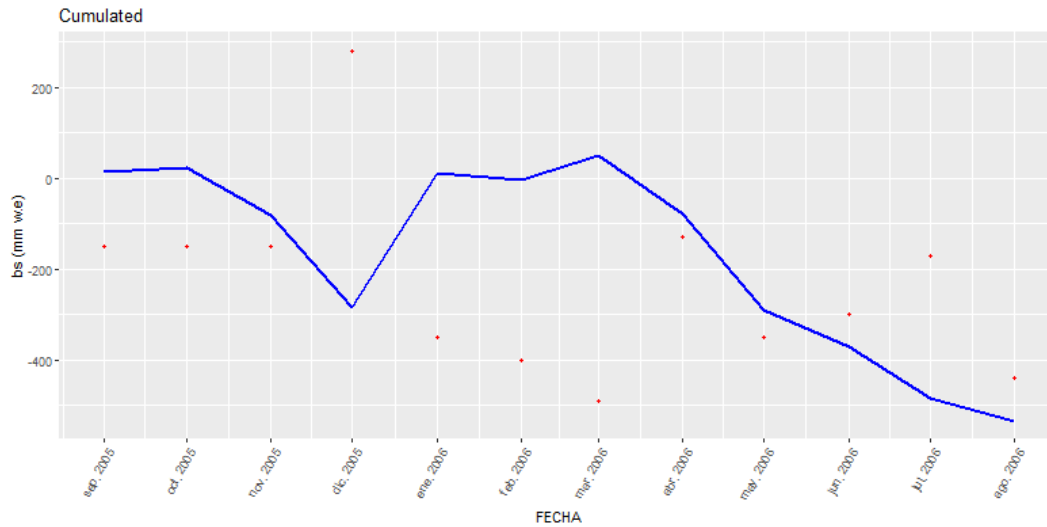


Figura A.95: Estaca 2E Sombras Projectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

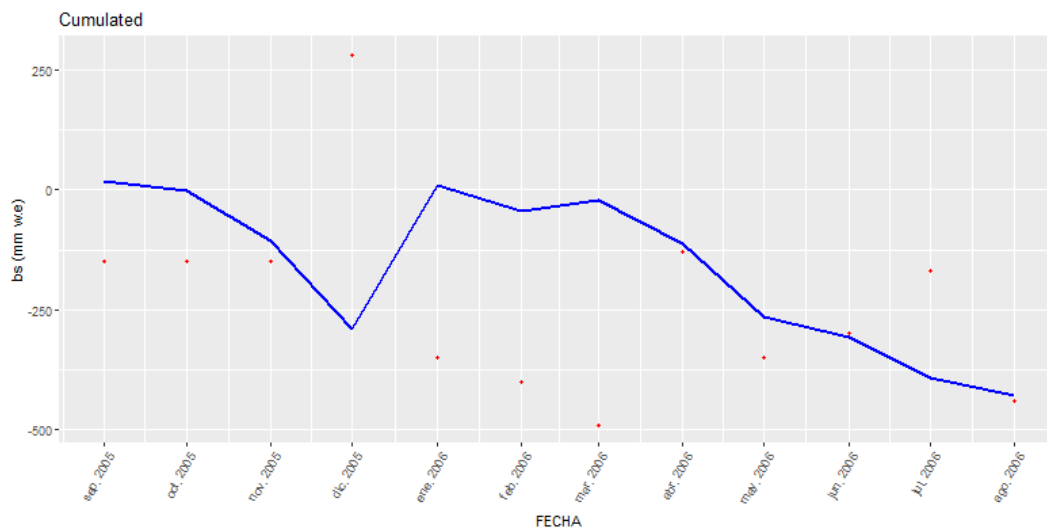


Figura A.96: Estaca 2E Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

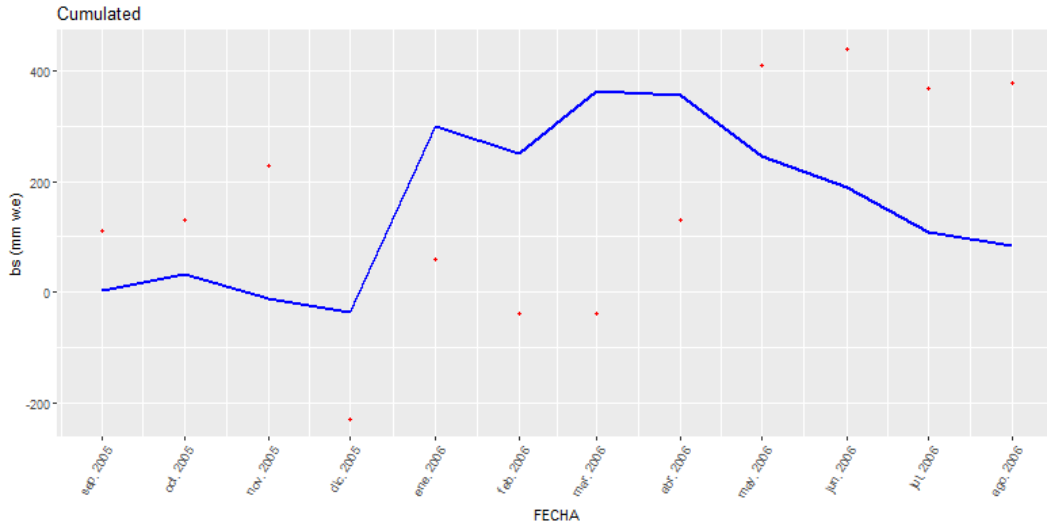


Figura A.97: Estaca X1 Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

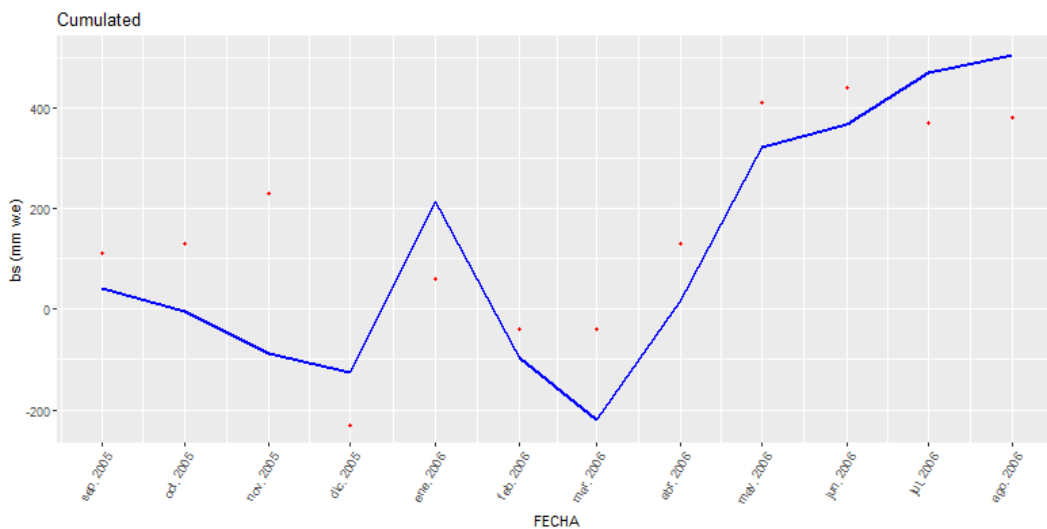


Figura A.98: Estaca X1 Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.



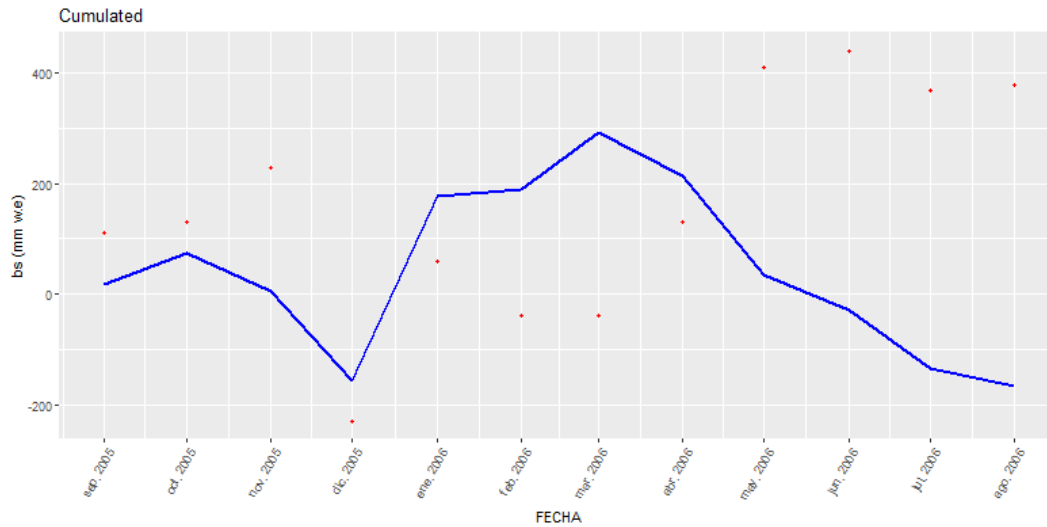


Figura A.99: Estaca X1 Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

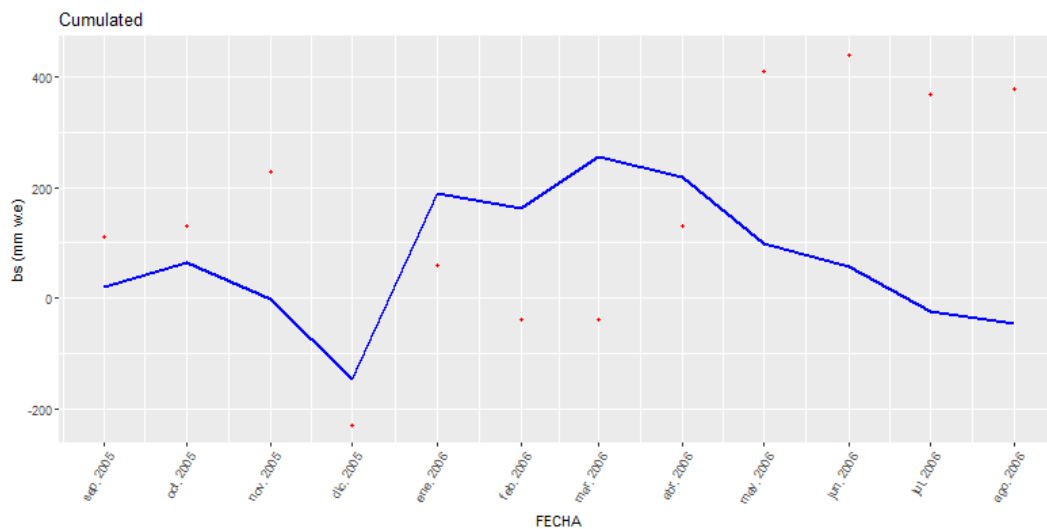


Figura A.100: Estaca X1 Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

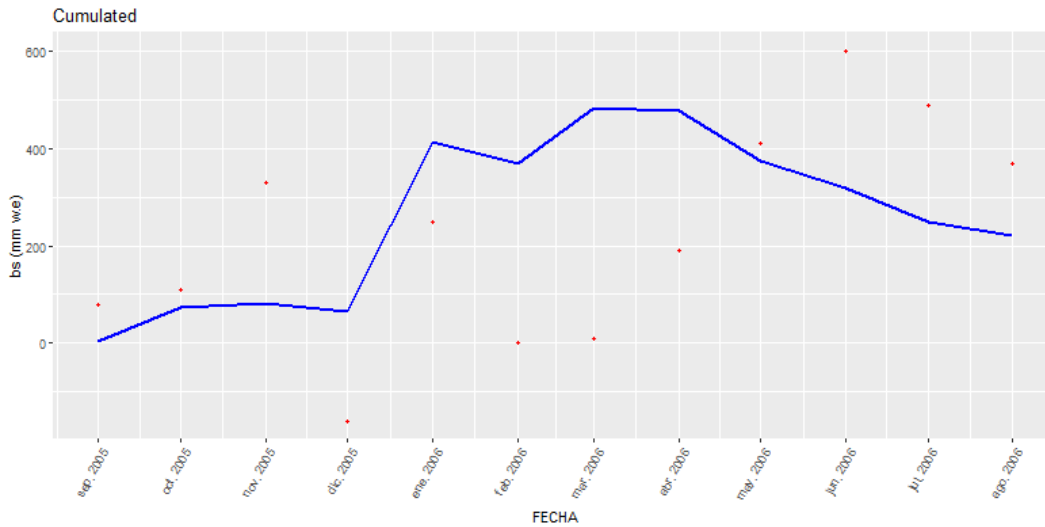


Figura A.101: Estaca X2 Relieve Sombreado (SR) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

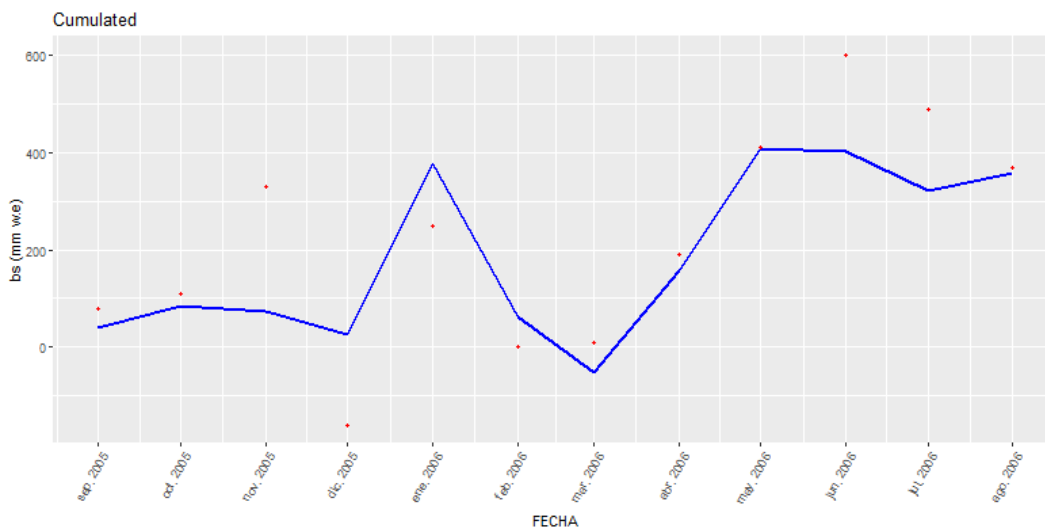


Figura A.102: Estaca X2 Pendiente y Aspecto (SA) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

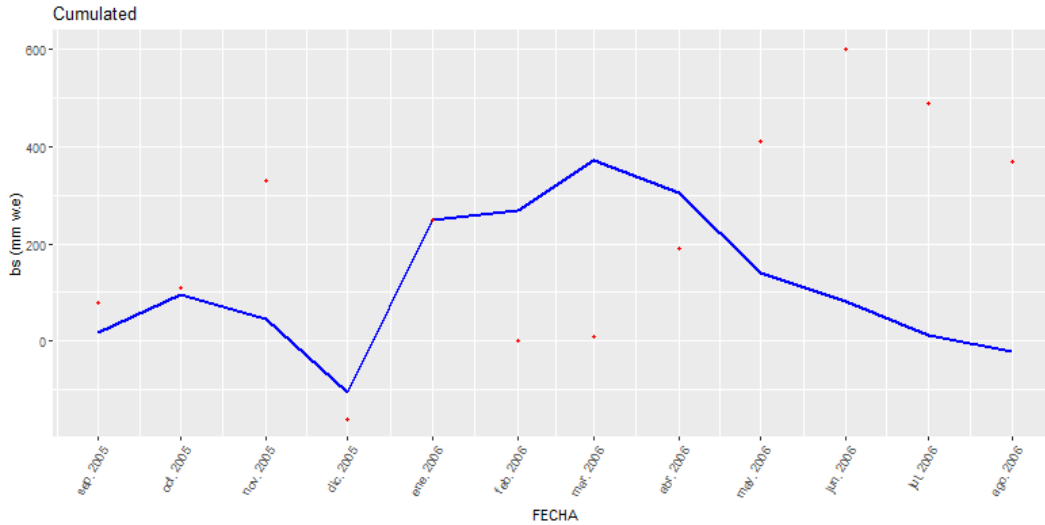


Figura A.103: Estaca X2 Sombras Proyectadas (CS) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.

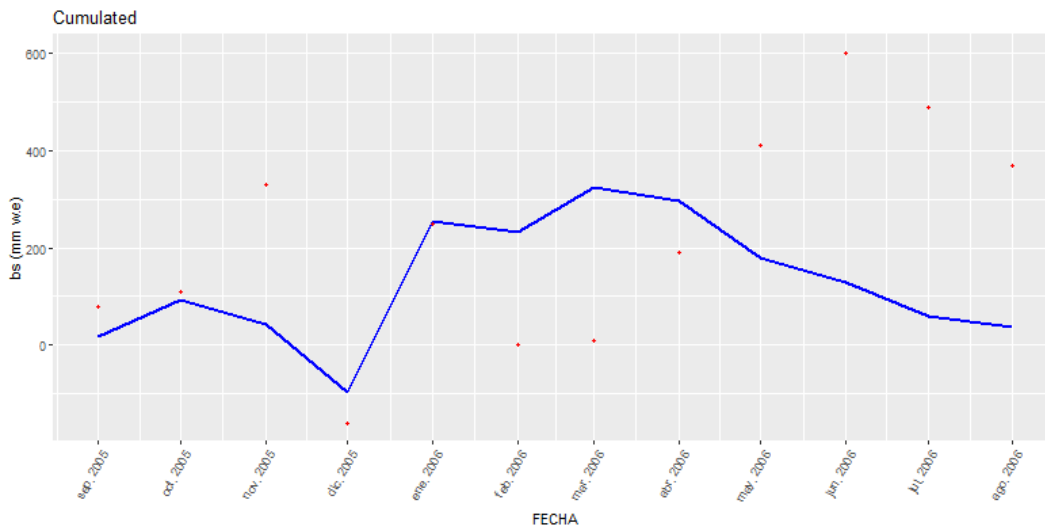


Figura A.104: Estaca X2 Combinado de los factores topográficos (C) - Balance de masa mensual acumulado simulado por el modelo de índice de temperatura mejorado para superficies de relieve accidentado y complejo (SETI) (línea azul) con parámetros recalibrados, para el año hidrológico 2005–2006, los puntos rojos son el balance de masa acumulado observado.