

Artículo de investigación



## Estimación del balance de masa de un Modelo de Índice de Temperatura Mejorado para superficies de relieve accidentado

### *Estimation of the mass balance of an Improved Temperature Index Model for Rugged Relief Surfaces*

Gabriela Quispe\* Pablo Fuchs Arce

\*Autor de correspondencia

#### HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 26 Agosto 2022  
Revisado 14 Septiembre 2022  
Aceptado 18 Septiembre 2022  
Publicado 19 Septiembre 2022

#### PALABRAS CLAVE

Balance de masa, Modelo de índice de temperatura, Glaciares tropicales, Glaciar Zongo

#### KEYWORDS

*Mass balance, temperatura-index modelling, Glaciares tropicales, Glaciar Zongo*

#### Resumen

El balance de masa es una metodología que aplicada adecuadamente en glaciares sirve para cuantificar el proceso de derretimiento que experimenta un glaciar. Con esta información se puede 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 los resultados cuando se modifica el modelo de índice de temperatura mejorado ETI, para analizar y evaluar el cambio que se produjo en los resultados del modelo al considerar el sombreado topográfico efectuado sobre y alrededor del glaciar. Se aplica el modelo 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 de energía superficial a diferentes altitudes, de modo que esta consideración influye en la respuesta del glaciar y la estimación del balance de masa.

#### Abstract

Mass balance is a methodology that properly applied to glaciers serves to quantify the melting process experienced by a glacier. 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 water supply and demand. The objective of this work is to show the results when the improved temperature index model ETI is modified, to analyze and evaluate the change that occurred in the model results when considering the topographic shading demonstrated on and around the glacier. The model is applied to the Zongo glacier and the monthly sensitivity of topographic shading is evaluated for two hydrological years 2004-2006. Our results show that topographic shading significantly alters the possible direct solar radiation in the clear sky 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 at different altitudes, such that this consideration influences the glacier response and mass balance estimation.

## 1. INTRODUCCIÓN

El retroceso de los glaciares ha sido uno de los cambios más notables en los Andes tropicales durante los últimos años, siendo mayor el retroceso en los glaciares pequeños con respecto a los grandes. La complejidad de los métodos de balance de masa en glaciares andinos, se deben 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, como por ejemplo las imágenes de satélites que muestran el retroceso de muchos glaciares.

El glaciar Zongo ha sido monitoreado de forma continua desde 1991, siendo la serie de tiempo más larga en los Andes Tropicales. Los modelos de índice de temperatura se han utilizado ampliamente para aplicaciones tanto glaciológicas como hidrológicas debido a su menor requerimiento de datos en comparación con los modelos más sofisticados de balance de masa. Recientemente, una creciente necesidad de simulaciones de alta resolución temporal y espacial de la velocidad de fusión (Hock, 2003) ha impulsado numerosos intentos de combinar la precisión de los modelos de balance de masa basados físicamente con la simplicidad de los enfoques de índice de temperatura (Pellicciotti et al., 2005).

En este estudio se propone desarrollar una modificación al modelo de índice de temperatura mejorado ETI (Pellicciotti et al., 2005), que considera el sombreado topográfico. El Modelo de Índice de

Temperatura mejorado para Superficies de relieve accidentado y complejo SETI considera un factor en el sombreado topográfico que se efectúa sobre y alrededor del glaciar durante la temporada de derretimiento, de modo que analizamos y evaluamos el cambio que produce en los resultados del balance de masa.

Así mismo desarrollamos un paquete en el lenguaje R que nos facilita el cálculo de la estimación de balance de masa considerando ese nuevo factor “sombreado topográfico” sobre el glaciar. Este estudio utiliza un conjunto de datos recopilados de estaciones meteorológicas del estudio Modelo de Índice de Temperatura Mejorado ETI (Fuchs et al., 2016) y un modelo digital de elevación (DEM).

Nuestros resultados al comparar los modelos ETI y SETI muestran que el sombreado topográfico altera significativamente en el equilibrio energético de la superficie de un glaciar siendo así un factor importante que influye en la respuesta de los glaciares y estimación de los balances de masas.

## 2. METODOLOGÍA

El estudio se realizó en el glaciar tropical Zongo que se encuentra ubicado en la región del macizo Huayna Potosí en la Cordillera Real, Bolivia ( $16^{\circ}15'S$ ,  $68^{\circ}10'O$ ) Figura 1, 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 msnm, cubre un área de  $1.90 \text{ km}^2$  (Fuchs, 2013).



Figura 1. 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.

### 2.1 Balance de masa

El balance de masa se produce por el intercambio entre el glaciar y la atmosfera. Estas contribuciones se realizan por varios procesos por ejemplo nevadas,

$$b_s = a - M - s \quad (1)$$

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

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

Donde  $\alpha$  es albedo y  $G$  ( $W m^{-2}$ ) es la radiación de onda corta entrante. El subíndice “i” denota datos para la zona de elevación i.  $TF$  ( $mm^2 \text{ } ^\circ C^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) y  $SRF$  ( $mm m^2 W^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) son dos coeficientes empíricos el factor de temperatura y el factor de radiación de onda corta, respectivamente (Pellicciotti et al., 2005). El  $T_T$  es un umbral de temperatura más allá de la cual se supone que ocurre la fusión. La adición de este umbral de temperatura explica el

$$\alpha_{snow} = \alpha_{firn} + (\alpha_{frsnow} - \alpha_{firn}) \exp\left(\frac{n_s - n}{t *}\right) \quad (2)$$

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 que tan rápido cambia el albedo de la nieve fresca al albedo firn después de una nevada.

$$\alpha = \alpha_{snow} + (\alpha_{ice} - \alpha_{snow}) \exp\left(\frac{-SWE}{d *}\right) \quad (3)$$

Donde  $SWE$  (mm w.e.) es el equivalente en agua (w.e., por sus siglas en ingles) de la capa de nieve sobre el glaciar 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

fusión, recongelación del agua, sublimación, que determinan el balance de masa superficial en un punto. Este cambio del balance de masa está representado por:

### 2.2 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:

hecho de que las condiciones de fusión no necesariamente ocurren a temperaturas del aire de  $0 \text{ } ^\circ C$  (Kuhn, 1987).

### 2.3 Parametrización del albedo

El albedo del sitio glaciar 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:

Para dar cuenta de la transición al albedo característico del hielo ( $\alpha_{ice}$ ) cuando la profundidad de la nieve es pequeña (Fuchs et al., 2016), el albedo de las capas delgadas de nieve se calcula como:

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:

$$SWE_n = \begin{cases} SWE_{n-1} + a_n - (M_n + S_n) & \text{if } SWE_{n-1} + a_n - (M_n + S_n) > 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

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 (Fuchs et al., 2016). Por lo tanto, el albedo era resuelto de forma iterativa.

#### 2.4 Modelado de radiación solar

El modelado de radiación solar determina con precisión la posición del sol para calcular

$$I_a = I_0 \left(\frac{R_m}{R}\right)^2 \Psi_a \frac{P}{P_0 \cos Z} \quad (5)$$

Donde  $I_0$  es la constante solar ( $\sim 1368 \text{Wm}^{-2}$ ),  $R$  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 de (Hock, 1999),  $P$  es la presión atmosférica calculada usando una tasa de lapso simple para el aire seco,  $P_0$  es la presión atmosférica media al nivel del mar, y  $Z$  es el ángulo cenital local. La ecuación (5) ha sido

adecuadamente la cantidad de radiación solar entrante efectuada sobre un plano considerando los efectos topográficos, mediante una combinación de los ángulos cenital ( $Z$ ) y azimutal, durante la temporada de fusión (Olson and Rupper 2019).

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:

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 (Olson and Rupper, 2019).

#### 2.5 Modelado topográfico

La radiación solar potencial de cielo despejado que llega a una superficie inclinada es:

$$I_c = I_a \cos \theta_i S \quad (6)$$

Donde  $I_a$  es la radiación solar directa de la atmósfera a cielo despejado ecuación (5);  $\theta_i$  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) (Corripio, 2003).

Usamos variaciones de la ecuación (6) para determinar el cambio medio diario en la radiación solar a partir de componentes topográficos

específicos que se muestran en la Figura 2, (Olson and Rupper, 2019). Las ecuaciones (7) a (10) muestran el cambio medio en la irradiancia solar debido a la pendiente y el aspecto, relieve sombreado, sombras proyectadas y el efecto combinado de estos componentes topográficos, todas estas ecuaciones dependen del ángulo de incidencia  $\theta$ :

$$\Delta I_{SA} = \frac{1}{t} \int_0^t I_a S [\cos \theta_i - \cos Z] dt \quad (7)$$

$$\Delta I_{SR} = \begin{cases} \frac{1}{t} \int_0^t I_a S [\cos \theta_i - \cos Z] dt, & \theta_i \geq 90^\circ \\ 0, & \theta_i < 90^\circ \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta I_{CS} = \frac{1}{t} \int_0^t I_a \cos \theta_i [S - 1] dt \quad (9)$$

$$\Delta I_{Com} = \frac{1}{t} \int_0^t I_a [\cos\theta_i - \cos Z] dt \quad (10)$$

La Figura 2, muestra la derivación de estas ecuaciones con respecto a la ecuación (6) 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 (7) a (10) calculan la

diferencia entre la ecuación (6) 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 (Olson and Rupper, 2019).

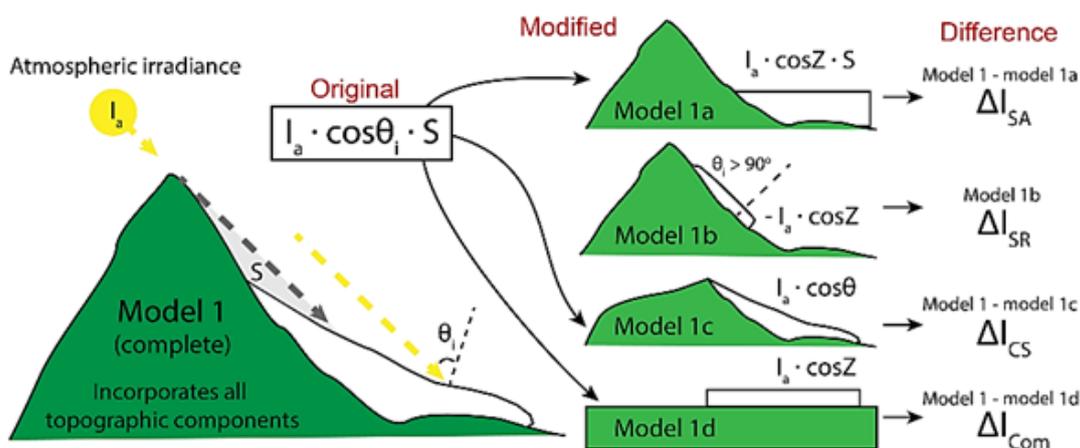


Figura 2. Muestra los componentes topográficos de interés. Fuente: Olson and Rupper (2019)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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 produce 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.

Para la aplicación de estos modelos se usaron datos como ser elevaciones de estacas, estaciones meteorológicas, temperatura del aire, precipitación, albedo, humedad relativa, velocidad del viento para dos años hidrológicos septiembre 2004 - agosto 2005 y septiembre 2005 - agosto 2006. Así mismos datos de radiación global, que en este estudio se tomara como G (direct + diffuse = Radiación de onda corta entrante), un ráster generado por 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). Utilizando la información

medida por la estación meteorológica automática (ORE Zongo a 5050 msnm) 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 1 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 en el algoritmo desarrollado en R.

Tabla 1. 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 día <sup>-1</sup> (°C <sup>-1</sup> )	(-0.48 – 2.16)	(-0.024 – 0.192)	(0.20 – 1.19)
Factor de radiación de onda corta (SRF)	mm día <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> W <sup>-1</sup>	(0.2088 – 0.2567)	(0.0211 – 0.0254)	(0.171 – 0.247)

Para que el algoritmo pueda realizar los cálculos el DEM (debe estar en coordenadas geográficas y formato RASTER) de una extensión que considere mínimamente 5 km o adicionales al shape de la cuenca glaciar (para el efecto sombreado circundante del glaciar). Olson and Rupper (2019) consideran 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 (package desarrollado en R). 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:

$$G_m = G_{global} + (I_{SR} + I_{SA} + I_{CS} + I_C) \tag{11}$$

Donde, G<sub>m</sub> es la radiación global mejorada, G<sub>global</sub> es la radiación global medida por la estación automática de temperatura AWS en el glaciar, (I<sub>SR</sub>, I<sub>SA</sub>, I<sub>CS</sub>, I<sub>C</sub>) 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 mejorada que considera los factores topográficos, calculamos la fusión con el modelo SETI, cuya formulación es:

$$M_i = \begin{cases} TF * T + SRF * (1 - \alpha) * G_m & T > T_T \\ 0, & T \leq T_T \end{cases} \tag{12}$$

Donde  $\alpha$  es albedo y G<sub>m</sub> (W m<sup>-2</sup>) es la radiación global mejorada que considera los efectos del sombreado en la topografía en el glaciar. TF (mm °C<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) y SRF (mm m<sup>2</sup> W<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) son los coeficientes empíricos, el factor de temperatura y el factor de

radiación de onda corta respectivamente. En las Figuras 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 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 2 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 el relieve sombreado SR. 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.

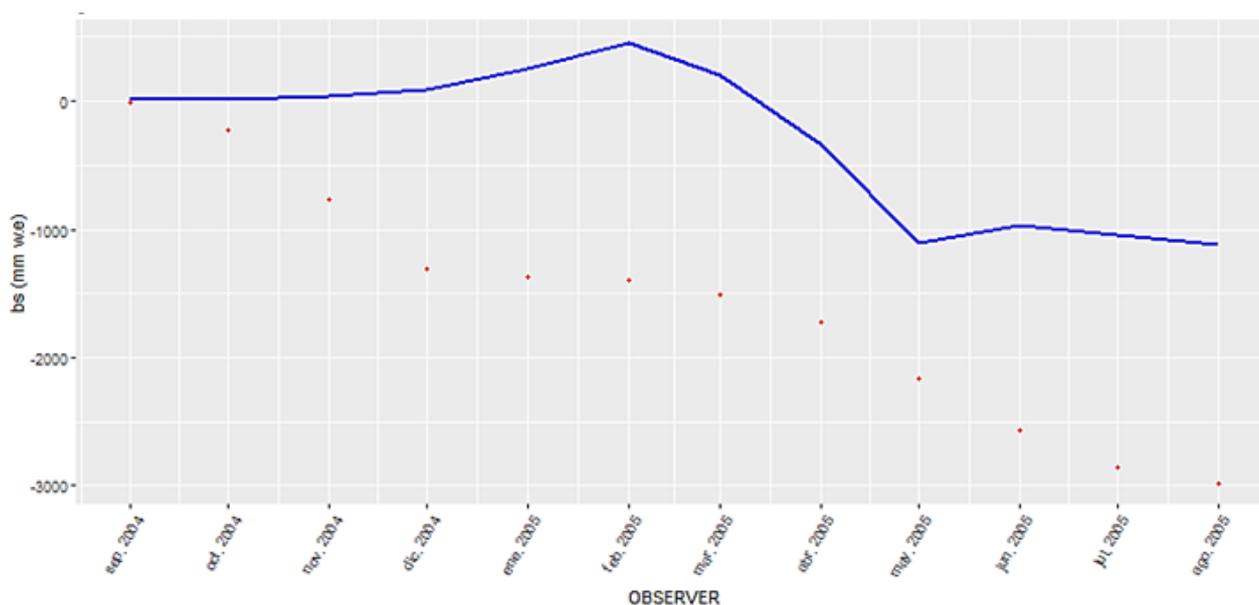


Figura 3. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005

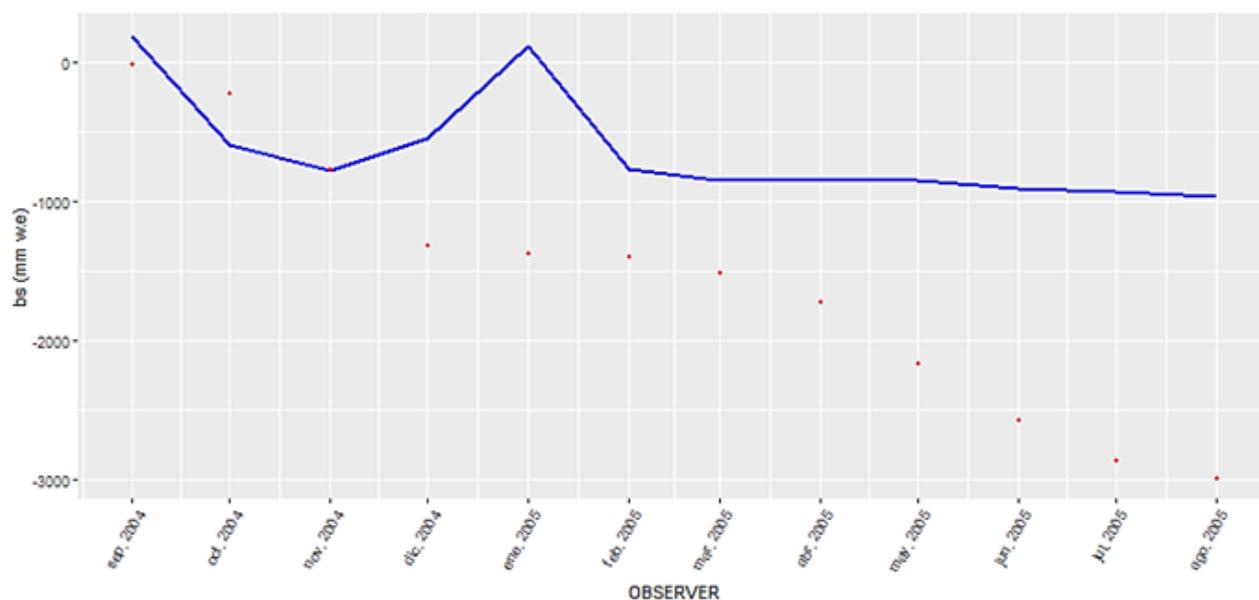


Figura 4. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005

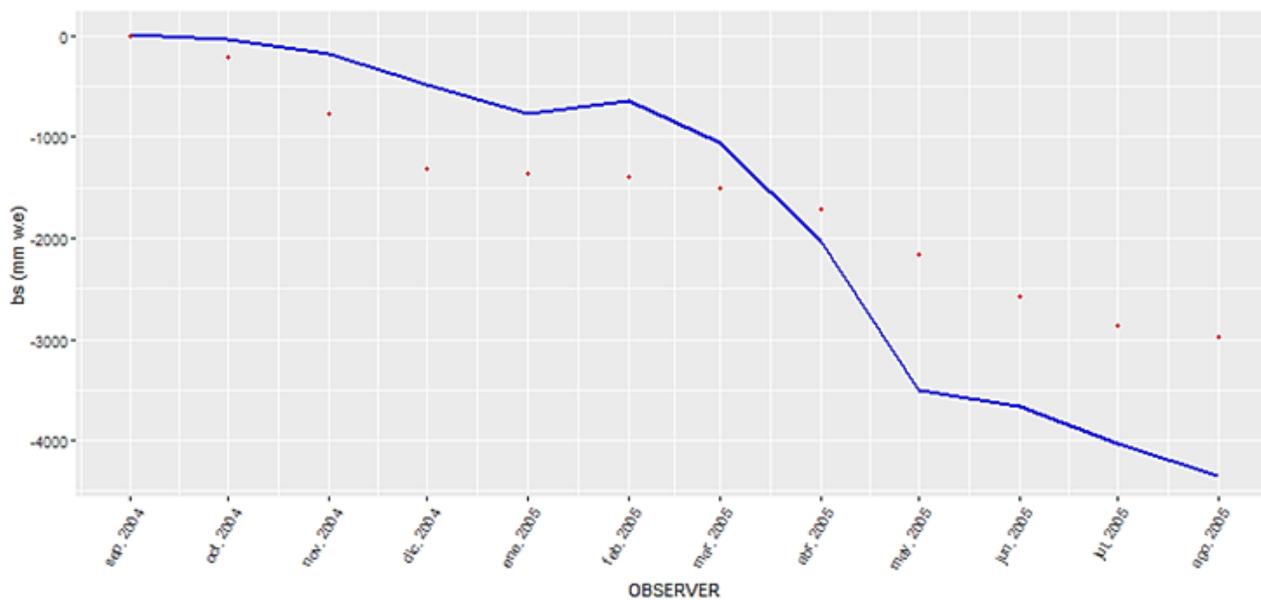


Figura 5. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005

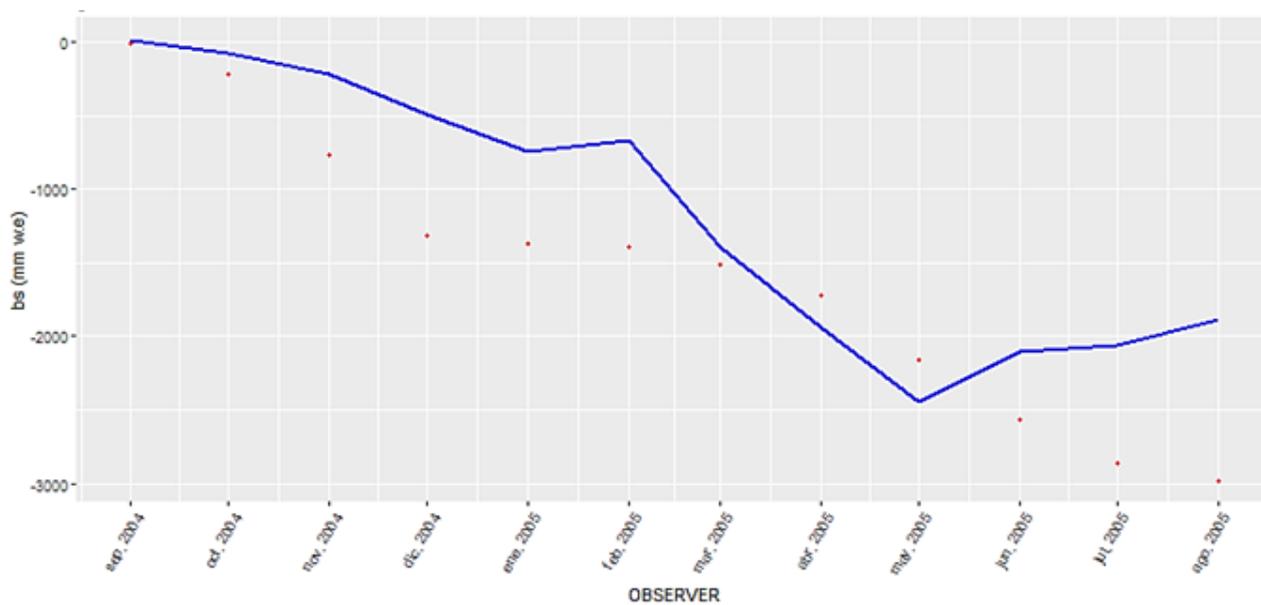


Figura 6. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 6K durante el periodo 2004-2005

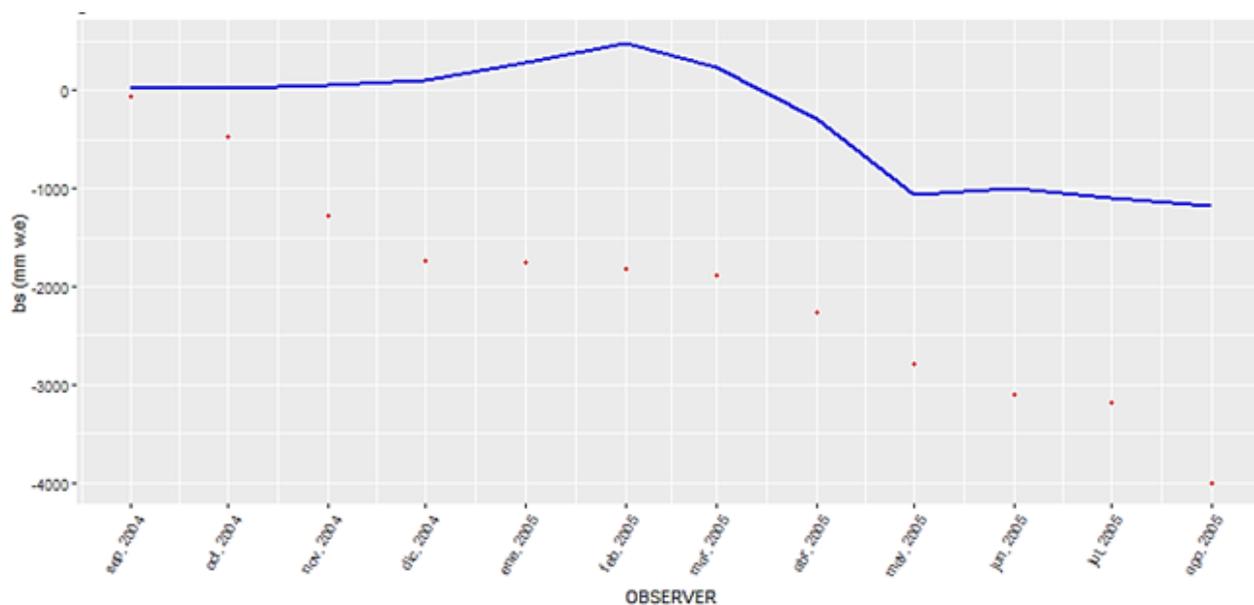


Figura 7. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando el relieve sombreado SR en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005

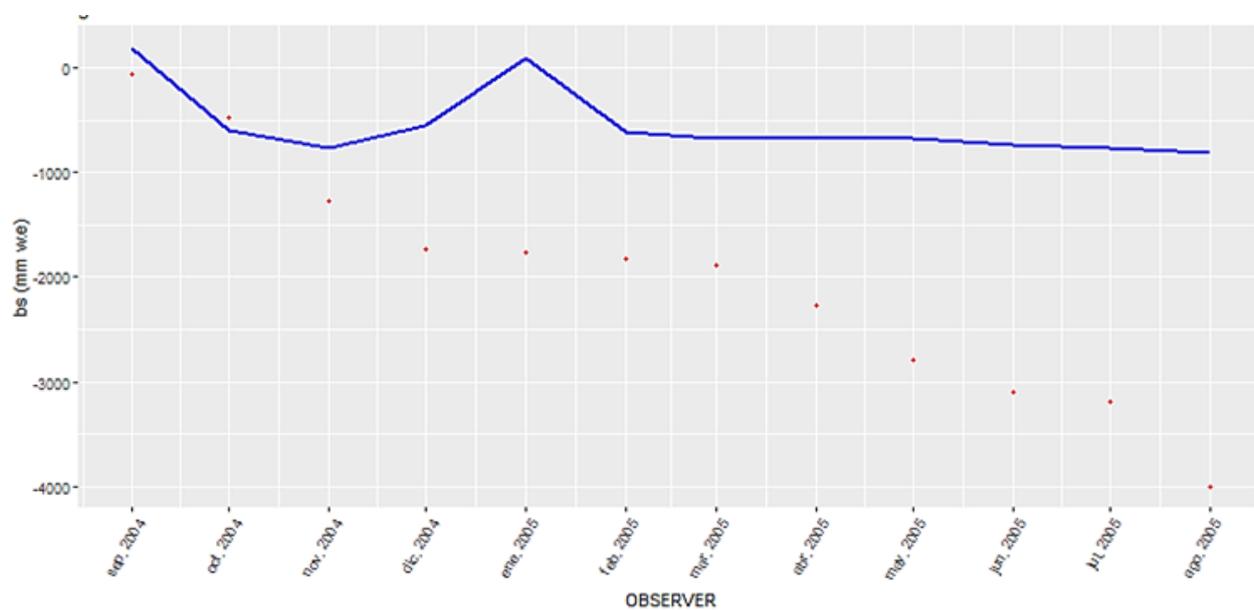


Figura 8. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la pendiente y aspecto SA en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005

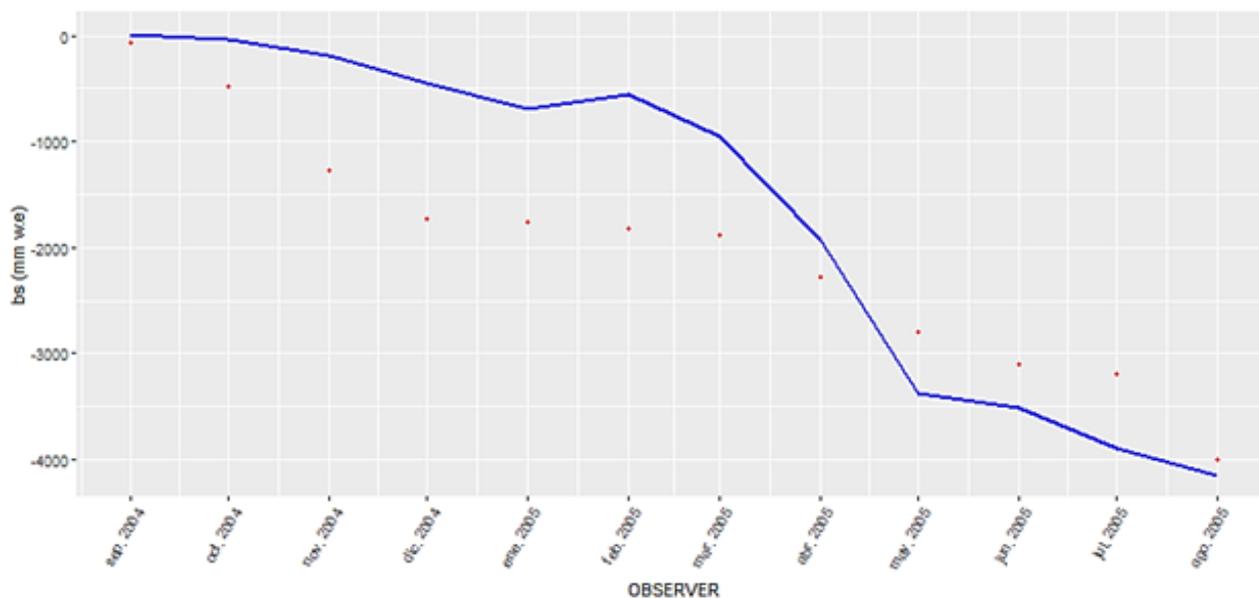


Figura 9. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando las sombras proyectadas CS en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005

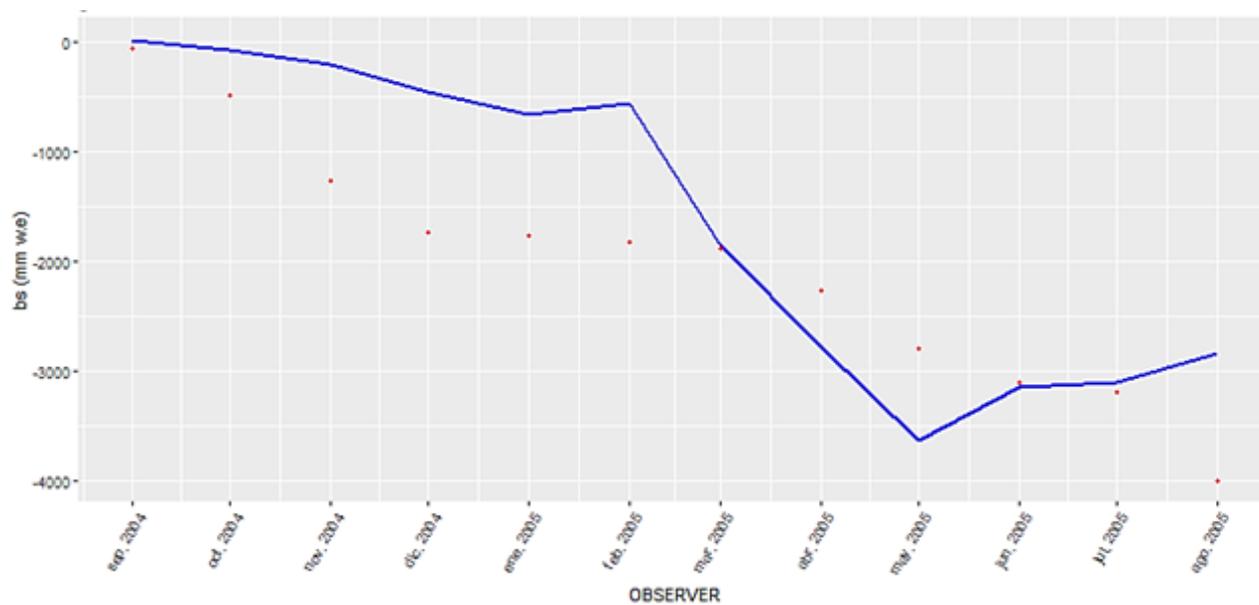


Figura 10. Balance de masa acumulado observado a nivel mensual (puntos rojos) y simulado por el modelo SETI (línea azul) considerando la combinación de los parámetros topográficos C en el glaciar para la estaca 2G durante el periodo 2004-2005

Tabla 2. 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 día <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	SRF wet (mm día <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> W <sup>-1</sup> )	TF dry (mm día <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	SRF dry (mm día <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> W <sup>-1</sup> )	MAE (mm día <sup>-1</sup> )	Bias (mm día <sup>-1</sup> )	RMS (mm día <sup>-1</sup> )
6K							
SR	0.9600	2.2540	0.0200	0.0702	1.483	-0.850	2.211
SA	1.9000	0.1315	1.9000	0.0090	2.058	0.725	2.412
CS	1.9000	0.0090	1.9000	0.0090	3.308	3.308	3.623
C	1.9000	0.0090	0.0200	0.0702	2.450	1.450	3.105
9K							
SR	1.9000	2.2540	1.9000	0.1315	2.325	1.242	2.951
SA	1.9000	0.1928	1.9000	0.0090	2.833	1.783	3.336
CS	1.9000	0.0090	0.0200	0.0702	5.942	4.492	7.254
C	1.9000	0.0090	0.0200	0.1315	5.550	4.017	7.022
10K							
SR	1.9000	0.2540	1.9000	0.1315	4.492	4.442	5.877
SA	1.9000	0.2540	1.9000	0.0090	2.525	1.158	3.666
CS	1.9000	0.0090	0.0200	0.0702	8.783	7.733	10.86
C	1.9000	0.0090	0.4900	0.1315	7.950	7.167	10.33
11K							
SR	1.9000	0.2540	1.9000	0.2540	2.900	0.300	3.510
SA	0.0200	0.2540	1.9000	0.0090	5.317	0.883	6.402
CS	1.9000	0.0090	1.9000	0.0702	6.775	6.725	7.925
C	1.9000	0.0090	0.0200	0.1927	6.717	4.100	7.931
12K							
SR	1.9000	0.2540	0.0200	0.254	4.492	3.892	5.795
SA	1.9000	0.2540	1.9000	0.0090	5.100	2.333	6.505
CS	1.9000	0.0090	1.9000	0.0702	10.91	10.91	12.69
C	1.9000	0.0090	1.9000	0.1927	9.583	7.850	11.72
4F							
SR	1.9000	0.1928	0.0200	0.1315	1.725	-0.375	2.202
SA	1.9000	0.1315	1.9000	0.0090	2.475	1.442	2.973
CS	1.9000	0.0090	0.0200	0.0702	4.292	0.242	4.632
C	1.9000	0.0090	1.9000	0.0702	2.683	1.967	3.326
2G							
SR	1.9000	0.2540	0.0200	0.1315	1.900	0.700	2.338
SA	1.9000	0.1928	1.9000	0.0090	2.225	0.642	2.668
CS	1.9000	0.0090	0.0200	0.0702	5.267	2.533	6.105
C	1.9000	0.0090	1.9000	0.0702	4.167	4.000	5.577
X1							
SR	1.9000	0.2540	1.9000	0.0702	2.417	1.333	3.273
SA	1.9000	0.1928	1.9000	0.0090	2.175	0.258	2.926
CS	1.9000	0.0090	1.9000	0.0090	4.675	4.675	5.399
C	1.9000	0.0090	0.0200	0.0702	3.517	2.583	4.713

La Figura 11 muestra la eficiencia del modelo SETI con respecto al error absoluto medio MAE para seis estacas que se encuentran ubicadas en elevaciones > 5100 msnm en el glaciar Zongo, la mayoría de las estacas que se encuentran a elevaciones mayores a 5100 msnm (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 de 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 11 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 consideró 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.

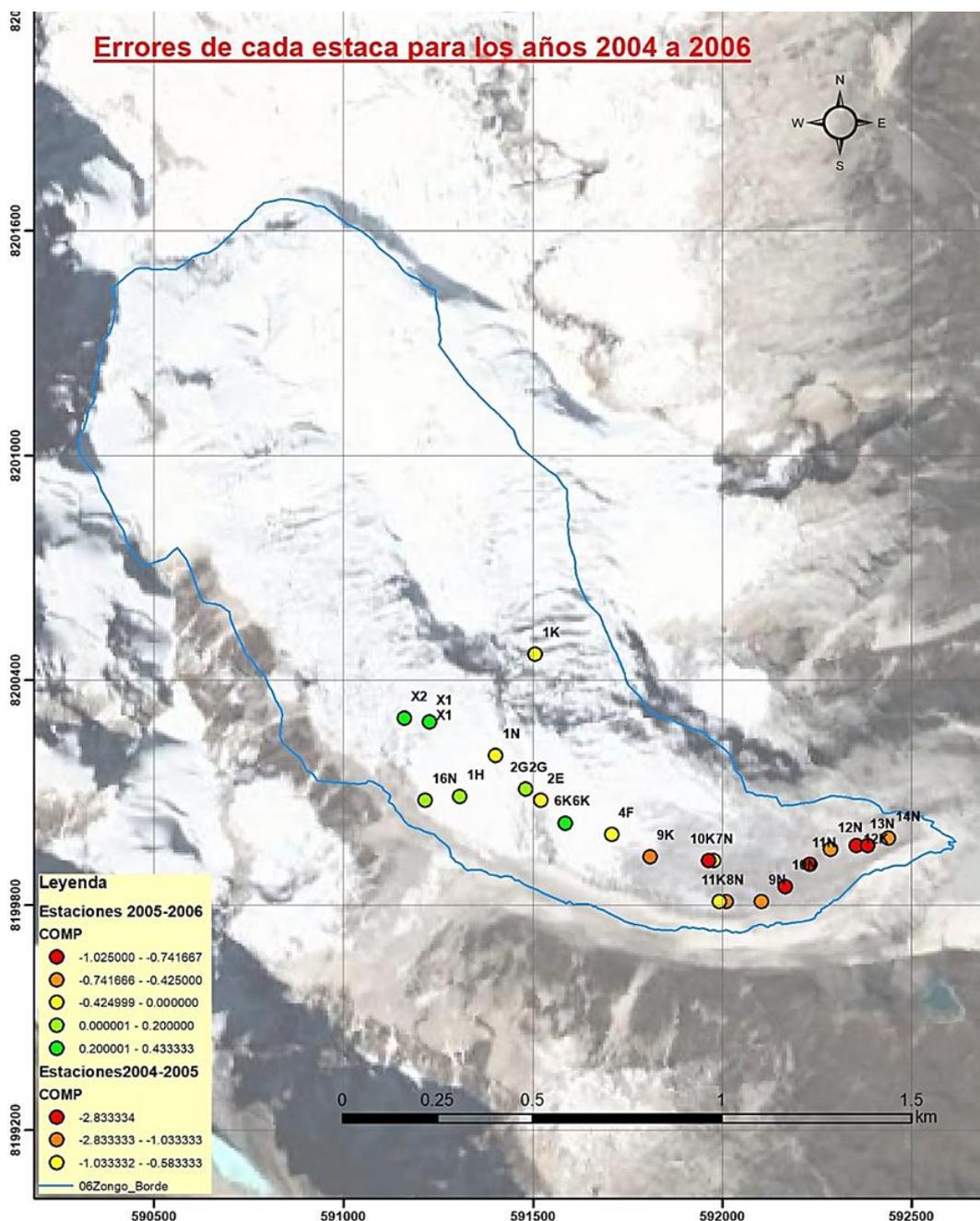


Figura 11. Eficiencia del modelo SETI para las estacas en el glaciar Zongo para los años 2004-2006

Las estacas de menor elevación (< 5100 msnm) 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. 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.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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. Para lo cual se recopilaron los datos meteorológicos para dos años hidrológicos septiembre 2004-agosto 2006, basados en el estudio de Fuchs et al. (2016). 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), Careno 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.

Se presentan mejores resultados en la simulación del balance de masa para aquellas estacas ubicadas en elevaciones mayores a 5100 msnm en el glaciar para los casos de relieve sombreado SR que presentan menores valores en el 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.

Olson and Rupper (2019) consideraron en su investigación estos parámetros que consideran el efecto de sombra en el glaciar, y que estos tendrían un papel importante para los modelos de fusión y balances de masas anuales. Nosotros considerando este análisis y la modificación del modelo ETI al considerar el sombreado topográfico en la superficie del glaciar concluimos que el balance de masa depende de las características locales en cada sitio y que la radiación solar incidente en la superficie altera significativamente a los glaciares particularmente a los de relieve accidentado. Generando nuevos valores en el balance de masa con respecto a los valores observados en campo en el glaciar.

Para mejorar los resultados de nuestro modelo SETI 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. Así mismo para futuras investigaciones se podría extender temporalmente un análisis sobre periodos más largos y posteriormente hacer un tratamiento de la información de modo que 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. Por último, 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 de transición entre la temporada húmeda y seca, para los periodos de estudio 2004-2006.

## REFERENCIAS

- 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.
- 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.
- 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.
- Hock, R. (1999). A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, 45(149):101–111.
- 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.
- 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 Carenzo, M. (2008). A study of the energy balance and melt regime on juncal norte glacier, semiarid andes of central chile, using melt models of different complexity. *Hydrological Processes*, 22(19):3980–3997.

---

*Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.*

---



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license